

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	磁場コイル用直流パルス電源に向けたフライホイール付自励誘導発電機の実証に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	村山真道
Author(English)	Masamichi Murayama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11519号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:飯尾 俊二,小栗 慶之,林崎 規託,片淵 竜也,筒井 広明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11519号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

学位論文

磁場コイル用直流パルス電源に向けた

フライホイール付自励誘導発電機の実証に関する研究

指導教員

飯尾 俊二 教授

提出者

東京工業大学  
環境・社会理工学院  
原子核工学コース  
村山 真道

2020年2月

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	磁場閉じ込め核融合	2
1.2	エネルギー蓄積装置・発電機の概要	5
1.3	トカマクと電源装置	6
1.4	本研究の目的・先行研究と対比した本研究の立ち位置	7
1.5	本論文の構成	11
第 2 章	フライホイール及び自励誘導発電機の原理	13
2.1	他方式の実績・検討	14
2.2	エネルギー蓄積装置としてのフライホイール	16
2.3	誘導発電機	22
第 3 章	非絶縁型自励誘導発電機直流パルス電源の設計と実証実験	43
3.1	トカマク装置 PHiX の概要	44
3.2	直流パルス電源用自励誘導発電機の設計	50
3.3	PHiX 用パルス電源の実験結果	53
第 4 章	(査読論文執筆中につき非公開)	71
第 5 章	(査読論文執筆中につき非公開)	73
第 6 章	結論	75
6.1	残された課題	76
参考文献		79



# 目次

1.1	核融合炉における燃焼反応候補の反応断面積 . . . . .	3
1.2	トカマク装置におけるトロイダル磁場 . . . . .	4
1.3	必要とされるパルス電力・時間に応じた適切なエネルギー蓄積要素 . . . . .	9
1.4	世界中のトカマク装置のトロイダル磁場コイル電源用エネルギー蓄積要素の比較 . . . . .	10
2.1	PHiX のトロイダル磁場コイル及び高電圧キャパシタバンク電源 . . . . .	15
2.2	高電圧キャパシタバンクを用いたトロイダル磁場コイル通電波形 . . . . .	16
2.3	フライホイールと回転子による 2 質量系とねじり共振 . . . . .	22
2.4	同期発電機と誘導発電機の構造の違いを示したイラスト . . . . .	24
2.5	自励現象を表現するための定常等価回路 . . . . .	25
2.6	PHiX トロイダル磁場コイル用ベクトル制御インバータの外観 . . . . .	27
2.7	PHiX トロイダル磁場コイル用ベクトル制御インバータの主回路図 . . . . .	28
2.8	PHiX トロイダル磁場コイル用ベクトル制御インバータの運転波形 . . . . .	29
2.9	自励誘導発電機とコイル負荷の接続方法例 . . . . .	31
2.10	uvw 相と $\alpha\beta$ 相の関係 . . . . .	35
2.11	$\alpha\beta$ 相電圧・電流への分解 . . . . .	35
2.12	ダイオード整流器電流の転流時の波形 . . . . .	36
2.13	キャパシタ自励現象を引き起こす回路構成 . . . . .	38
2.14	誘導機と自励キャパシタの電流-電圧曲線 . . . . .	38
2.15	自励誘導発電機の運転シーケンスの概要 . . . . .	39
2.16	ペリオドの計算例 . . . . .	42
3.1	PHiX の装置外観 . . . . .	45

3.2	PHiX の周辺機器類 . . . . .	46
3.3	ポロイダル磁場コイル制御盤とポロイダル磁場コイル群 . . . . .	47
3.4	PHiX の予備電離用マグネトロン . . . . .	48
3.5	PHiX のポロイダル磁場コイルを用いた軽負荷通電試験の回路構成 . . . . .	53
3.6	加速制御のブロック線図 . . . . .	54
3.7	加速用インバータの V/f 制御設定 . . . . .	55
3.8	PHiX 用自励誘導発電機の充電加速波形 . . . . .	56
3.9	PHiX 用自励誘導発電機のビルドアップ特性（時間発展） . . . . .	57
3.10	PHiX 用自励誘導発電機の自励キャパシタ容量と定常時の発電機電圧の関係 . . . . .	58
3.11	軽負荷となるポロイダル磁場コイルに通電したときの回路構成 . . . . .	59
3.12	PHiX のポロイダル磁場コイルを用いた軽負荷通電試験結果 . . . . .	60
3.13	重負荷となるトロイダル磁場コイルに通電したときの回路構成 . . . . .	61
3.14	PHiX におけるコンタクタ接続による負荷通電試験結果 . . . . .	62
3.15	PHiX トロイダル磁場コイル用自励誘導発電機制御盤内外の写真 . . . . .	63
3.16	PHiX トロイダル磁場コイル用自励誘導発電機制御盤の主回路構成 . . . . .	64
3.17	基本自励キャパシタのみでの通電波形 . . . . .	67
3.18	追加自励キャパシタありでの通電波形 . . . . .	68
3.19	実験に伴う自励キャパシタ投入量と指令値電流を変化させたときの運転可能領域 . . . . .	69

## 表目次

3.1	PHiX の主要パラメータ . . . . .	49
3.2	PHiX 用フライホイールエネルギー蓄積装置の概要 . . . . .	52
3.3	PHiX 用自励誘導発電機制御盤に用いられている主要部品 . . . . .	64

## 第 1 章

### 序論

## 1.1 磁場閉じ込め核融合

核反応について述べる前に、原子や分子の探求の歴史について述べる [1,2]。古来より物質をその性質によって分類する試みは繰り返されてきた。古代中国ではすべてのものの根源は火・水・木・金・土に分類される五行思想が、また古代ギリシャでは火・水・土・空気を元素とする四元素説が広く信じられていた。7 世紀後半頃には卑金属を貴金属へ変えることを目的とした錬金術が古代エジプトからアラビア、スペインを経てヨーロッパに広まった。結局、当時の技術では卑金属を貴金属に変えることはできなかったが、分析技術や実験技術の進歩に貢献した。しばらく時が経ち、17 世紀になると著名な科学者らによって元素の解明が急速にすすんだ。このころにボイル、ラヴォアジエ、プールのスト、ドルトンらによって質量保存の法則やドルトンの原子説といった現在でも重要な説が唱えられ、最終的にニューランズやメンデレーエフらによって周期律が発見されることとなる。

19 世紀後半には J.J. トムソンにより陰極線の比電荷測定、レントゲンによる X 線の発見、ベクレルによるウラン放射能の発見、キュリー夫妻によるポロニウムとラジウムの発見があった。興味深いことに、この時点で原子模型はまだ決定されておらず、20 世紀初頭のラザフォードによる  $\alpha$  粒子の散乱実験実験を待たなければならなかった。ラザフォードの実験では  $\alpha$  粒子のほとんどが直進する一方、一部の  $\alpha$  粒子が鋭い散乱を受けていた。このことから、原子の正電荷はごく狭い領域に集中していること、すなわち原子核が存在することが明らかとなった。さらに 19 世紀半ばになるとラザフォードの弟子であるチャドウィックによって中性子が発見された。その後の原子核物理の進展は早く 1939 年にはハーンらがウランの核分裂を発見し、1942 年にはフェルミらが世界初となる原子炉で核分裂連鎖反応に成功している。その後、素粒子理論や加速器を用いた実験の発展により近年に至っても宇宙ニュートリノやヒッグス粒子の発見等の素粒子物理学における進展が見られる。以上は物理学における基礎研究的側面での発見であったが、それと並行して原子力工学として発展が進んでいる。1954 年にソビエト連邦が世界初の原子力発電所の運転を始めて以来、2018 年現在世界中で 450 の原子炉が稼働中である [3]。日本国内では、1963 年に茨城県東海村で初の発電用原子炉 (JPDR) を運転を初めて以来、日本の原子炉については、2020 年 1 月末時点で 6 基が営業運転中、26 基が定期検査停止中、1 基が運

転調整中である。

一方核融合については原理的に大型化が必要と判明したため、原子炉に比べてその開発の進展がゆっくりとしたものになっている。1905年にアインシュタインによる特殊相対性理論の発表により質量とエネルギーの等価性が示されてしばらくした後、1939年にベータによって恒星のエネルギーが核融合によって放出されることが解明された。1回の核融合反応によって放出されるエネルギーは数十 MeV 程度であり、これは1回の化学反応によって放出される約 10 eV 程度の 100 万倍であることが確認された。図 1.1 で示されるように、反応断面積が大きく（反応が起こりやすく）、核融合炉の燃料として有力な  $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$  で表される DT 反応では1回の反応で 17.6 MeV のエネルギーが放出される。燃料の物質質量で考えると 1.70 TJ/mol となり、化学反応における反応熱と比較して桁違いのエネルギーを得られることがわかる。

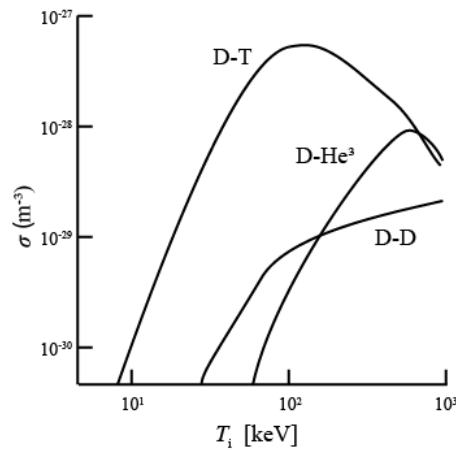


図 1.1: 核融合炉における燃焼反応の候補の反応断面積。

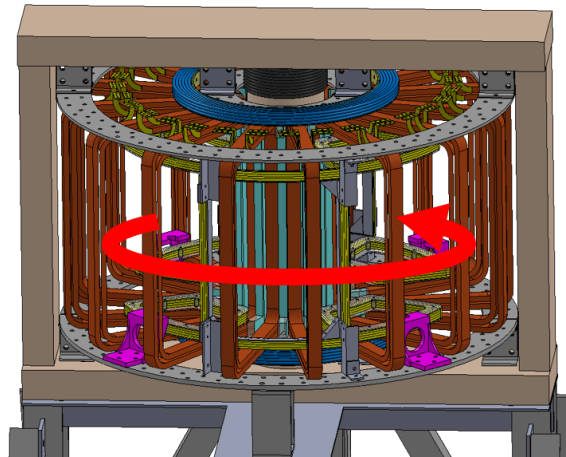


図 1.2: トカマク装置におけるトロイダル磁場。PHiX では 16 本のトロイダル磁場コイルにより真空容器内を周回するトロイダル磁場が発生している。これと直交する磁場をポロイダル磁場と呼ぶ。

しかし反発しあう水素原子同士を衝突させることは容易ではなく、核融合炉の方式としては磁場で高温のプラズマを閉じ込める磁場閉じ込め核融合と加熱した燃料が飛散する前に反応を終了させる慣性核融合が主に研究されている。現在、地上での核融合炉として有力なトカマク型を発明したのはソビエト連邦の首都モスクワにあるクルチャトフ研究所の科学者たちである。直線装置を環状につないだ単純トーラスでは、曲線を描く磁力線に沿って円運動する際の加速度（遠心力）と磁場の曲率でドリフトと呼ばれる現象が発生して本来中性であるべきプラズマが荷電分離を起こしてしまう。この荷電分離によりさらにドリフトが発生してプラズマリングはトーラスの大半径外側に広がり、高温のプラズマを維持することができなくなる。そこで荷電分離を防ぐために磁力線に捻りを加えて電荷を中和する必要がある。この問題を解決するために考案されたのがトカマクとステラレータである [4]。トカマクはプラズマ内に電流を流すことで磁力線に捻りを与える。またステラレータは真空磁場（外部コイルによる磁場）によって磁気軸が平面上にある平面軸ステラレータと、磁気軸自体が螺旋になっている立体磁気軸ステラレータに分類される。いずれも単純トーラスで起こる荷電分離を中和することができる。

しかし、電荷を持たない中性子で連鎖反応が起こる原子炉（核分裂炉）とは異なり、核融合炉は反発しあう荷電粒子同士を衝突させる必要があることから原子炉に比べて装置が複雑・大型になる傾向がある。現在、ト

カマクは世界三大トカマクである JET, TFTR, JT-60 を経て、世界 7 極の協力の下に ITER (International Thermalnuclear Experimental Reactor, 国際熱核融合実験炉) の建設が進められている。またヘリカル型では LHD、Wendstein 7-X 等の大型装置での実験が進められている。以上のように、核融合研究・核融合炉建設は 20 世紀までの多くの科学的発見を基礎にして進められてる総合科学である。

## 1.2 エネルギー蓄積装置・発電機の概要

エネルギー蓄積装置と発電機について概要を述べる。第一のエネルギー蓄積要素について、時間という要素を考えず発生側と消費側でのエネルギー量のみを議論するのであればエネルギー蓄積装置は不要なものである。しかし本研究で扱うフライホイールに限らずエネルギーを一時的に蓄える装置は古来より広く用いられてきた。なぜならエネルギー蓄積装置によって小出力・長時間の仕事を大出力・短時間の仕事に変換すること、またその逆が可能だからである。例えば人間が金槌を用いて材料を加工するときには金槌の質量という運動エネルギー蓄積要素を介して、腕を振り下ろすという比較的小出力・長時間の仕事を撃力という極短時間に大きな力を発生させる仕事に変換している。またこの反対に人間が自転車を運転する際には、自転車・運転者の質量を利用して、脚力によって発生する単発的なレシプロ運動を車輪の回転という小出力・連続の仕事に変換することができる。前者の働きはパルス化、後者の働きは平滑化と呼ぶ。現在でも機械装置内でエネルギー蓄積装置を利用している例は枚挙にいとまがないが、どれもエネルギー量が一定ではあるが仕事を行う時間を変化させることでエネルギー発生側の出力または運転時間の上限・下限の制約を回避するために用いられている。

第二の発電機について、これは電磁気学とエジソンとニコラ・テスラによる電流戦争を境に急激に発展した分野である。産業革命以後も発電機が発明されるまではエネルギー利用については蒸気機関の利用、すなわち熱力学や機械工学の応用が主であり、電磁気学の動力への応用は進んでいなかった。電磁気学は紀元前 6 世紀のタレスによる琥珀による摩擦電気の観察まで遡る非常に古い起源を持つが、電磁気学として定式化されて産業に広く用いられるようになるためには 18 世紀の発見を待たなければならない。ボルタ、クーロンらによって電気の理解が進んだのち、アンペール、ビオ、サバル、ファラデー、マクスウェルらによって古典電磁気学は完成を見た。その後量子力学の発展により電磁気学はさらなる進化を遂げているが、発電機技術のために利用されるのは古典電磁気学までである。もちろんパワーエレクトロニクス技術の一翼を担う半導体工学を理

解するためには固体物理学の理解が必要となる。ニコラ・テスラによって誘導電動機や同期発電機が発明されてから [5]、現在においても発電機はタービンやエンジンといった原動機と組み合わせることで、発電所や非常用発電設備で広く用いられている。近年は自然エネルギーの分野において、太陽光発電所や蓄電池式の電力貯蔵設備では出力部に半導体電力変換器（インバータ）を備えることで回転部を持たない発電設備・蓄電設備も増えている。しかし、もともと回転部を持っている風力発電等では専ら発電機が用いられている。以上のように、19 世紀後半に発電機が発明されて以降、現在も動力と電力の繋ぎ目として発電機は利用され続けている。

### 1.3 トカマクと電源装置

磁場閉じ込め核融合において、超高温のプラズマを温度を維持したまま閉じ込めるためにはイオンと電子が磁力線に巻きつく性質を利用する。磁力線はプラズマ外の磁場コイル電流とプラズマ中を流れるプラズマ電流の組み合わせで生み出されるため、コイル電流を駆動する電源装置はトカマクにとって必須のものである。図 1.2 が示すように、トカマク装置ではトロイダル方向の磁場とポロイダル方向の磁場を分けて考える。トロイダル方向の磁場を作るのがトロイダル磁場コイル、ポロイダル方向の磁場を作るコイルはポロイダル磁場コイルと呼ばれる。またポロイダル磁場コイルはその働きによって名前をつけられることもある。命名法は装置によって異なるが、オーミックコイル、ダイバータコイル、D コイル、Q コイルといったものもポロイダル磁場コイルの一種である。

現在のトカマクは比較的強力な一定のトロイダル磁場に、磁場強度や方向が可変であるポロイダル磁場を加えて運転が行われる。実験前にトロイダル磁場をフラットトップ（平坦な波形）にした後、ポロイダル磁場によってプラズマの着火と位置形状制御を行う。実験終了後、ポロイダル磁場コイル電源、トロイダル磁場コイル電源の順に停止されていく。電子サイクロトロン共鳴加熱のために強力な（小型装置では 1 kW～、中型装置以上では 1 MW～程度）マイクロ波を入射する場合、トロイダル磁場が励磁されていないとプラズマではなく真空容器や容器内構造物を加熱してしまうため、トロイダル磁場コイル電源は実験終了後マイクロ波が停止するまで運転される。またプラズマの断熱圧縮加熱実験のためにトロイダル磁場を途中で強くすることもあるがこれは特殊な運転である。以上の特徴から、トロイダル磁場コイル電源は比較的大容量・長時間・一定負荷であり、ポロイダル磁場コイル電源は比較的小容量・短時間・高速電流制御が必要といった特徴がある。また

一般的に実験の自由度を上げるためにポロイダル磁場コイルは複数取り付けられており、ポロイダル磁場コイル電源は複数の変換器から構成される。多数のポロイダル磁場コイルによって多彩なプラズマ断面形状を実現しているトカマクとして、スイス EPFL の中型トカマク装置 TCV が挙げられる。[6,7]。多数のコイルとそれらを制御する制御器（コントローラ）を使用することで真空容器内の様々な位置でプラズマを維持できる他、縦長断面やそら豆形といった複雑な形状も実現できる。

以上のように磁場コイルを多用するトカマク装置は一般的に大電力を消費する。近年超伝導技術の発達により、一部のトカマク装置では磁場コイルに超伝導巻線を使用することで消費電力を大幅に削減するいわゆる超伝導トカマクが採用されているが、液体ヘリウムの循環系を持つ冷凍機が必要となり保守・点検・運用が複雑になることから、ほとんどの小型・中型トカマク装置は常伝導である銅コイルによって必要な真空磁場が作られている。むしろ、小型装置では装置固有の目的、すなわち解明したい物理機構に応じて設計されることが多く、長時間運転が不要であることがほとんどである。具体的には東京工業大学 PHiX はトカマクプラズマの垂直位置不安定性抑制を、九州大学 PLATO は乱流プラズマ計測を目的としている。これらの現象は数ミリ秒程度以下のイベントであるため、超伝導トカマクの利点となる秒オーダー以上の長時間放電は必要としない。これとは反対に、九州大学にある球状トカマク装置 QUEST は現象の時定数が数秒から数十秒と非常に長いプラズマ壁相互作用に着目した実験装置である。そのため QUEST では常伝導コイルを冷却すること常時磁場を発生させ、高周波によってプラズマ電流を駆動することで連続運転を行っている。

## 1.4 本研究の目的・先行研究と対比した本研究の立ち位置

本研究の目的は小型トカマク装置の磁場コイル電源にフライホイール付き誘導発電機を適用することによって電源装置の大幅な小型化を達成することである。

一般に、風力発電のように発電電力が急峻に変動する場合 [8] や、鉄道用電気設備の受電端において大きな電圧変動が発生する場合 [9]、加速器の運転により大きな電力潮流が発生する場合 [10] には、電力系統と設備の間にエネルギー貯蔵装置を設置して電力潮流の平滑化や電圧維持を行う。図 1.3 に示すように、このときエネルギーを蓄積する要素は補償する電力や時間によってキャパシタ、蓄電池、フライホイールが使い分けられる。

多くのトカマク装置は数ミリ秒から数十秒程度のパルス運転であり、瞬間的に大電力を消費する。その大電

力に合わせて変電所や配電盤等の電気設備を用意することは非経済的であることから、トカマク装置はエネルギー貯蔵装置を付随していることがほとんどである。図 1.4 は世界のトカマク装置の規模とトロイダル磁場コイル電源方式を比較した図である。トカマク装置のトロイダル磁場コイル電源は大きく分けてキャパシタ方式、フライホイール方式、直接受電方式がある。系統として、小型の装置ではキャパシタ方式が多く、また中型装置以上ではフライホイール方式が主流である。図 1.4 は世界のトカマク装置の電源方式を比較したもので、図の縦軸と横軸はそれぞれトカマク装置のトロイダル磁場と大半径を表している。図左下の小型装置はキャパシタバンク方式の装置が多く、図右上の大型装置になるほどフライホイール方式が主になっている。また特に超伝導コイルを用いた装置になると自らエネルギー貯蔵装置を持たず、電力系統から直接電力を受電している。

以上のように一般的に小型装置ではキャパシタが用いられるが、以下のような問題点がある。第一に、キャパシタは単位体積当たりの密度が小さく、また絶縁のために互いに距離を取る必要があることから密集して設置することが難しい。これに対してフライホイールは鉄製の円盤で構成することでキャパシタに比べて非常に高い密度でエネルギーを蓄えることができる。また発電機は小型のものから大型のものまで選択肢が広く、需要に応じて適切な規模の発電機を選択することができる。第二に安全性である。一般的にキャパシタはコイルに電流を供給する電力変換器に直接接続されているため、電力変換器内で事故が発生して短絡状態となるとキャパシタ内のすべてのエネルギーが電力変換器へ供給されてしまう。またキャパシタから出力される直流電流を遮断することは難しく、事故電流を遮断するような遮断器は現実的ではない。これに対して発電機は出力インピーダンスが比較的大きく、交流電流を出力するため遮断が容易である。また出力を遮断することで発電機をフリーラン状態、すなわち電圧は発生していないがフライホイールが無負荷で回転している状態にすることが可能である。このようにフライホイールは運動エネルギーとしてエネルギーを蓄えているためコイル側の電気回路とは切り離して運用することが可能である。もちろん回転体を扱うため機械類の安全性の確保は必要となるが、キャパシタに比べて発電機は電気回路側の事故時の安全性が大きいと言える。

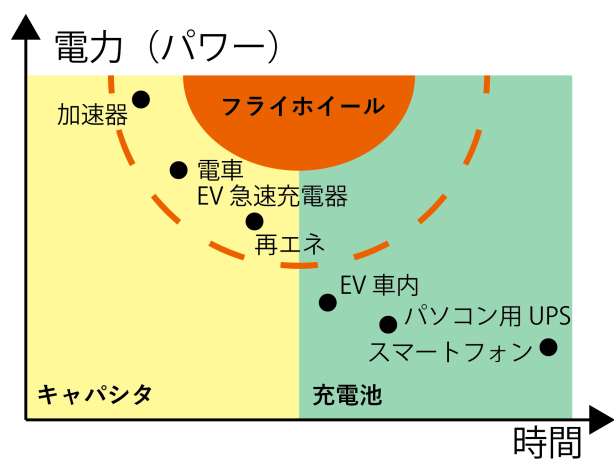


図 1.3: 必要とされるパルス電力・時間に応じた適切なエネルギー蓄積要素。短時間で高出力のパルス電力が必要な場合にはキャパシタ、低出力で長時間のパルス電力が必要な場合には充電池が適している。フライホイールは時間がキャパシタ・充電池の中間程度で特に大出力の場合に適する。

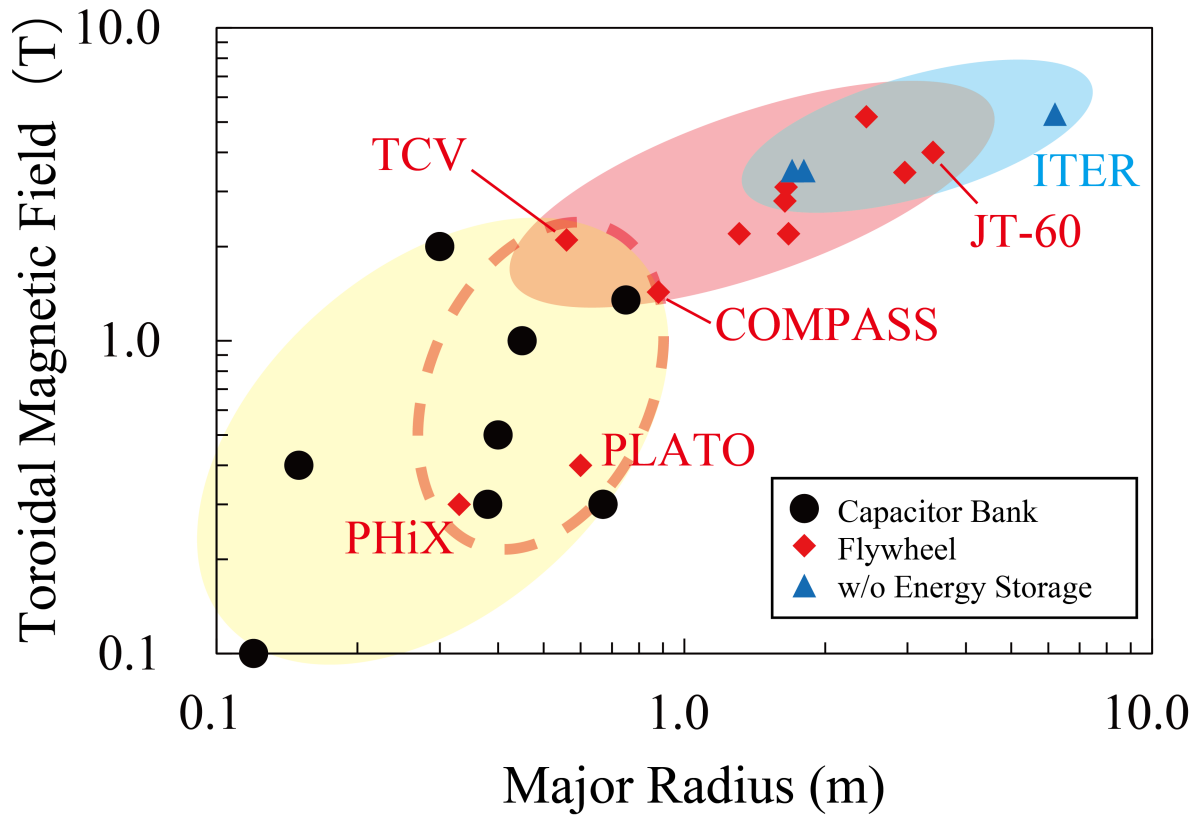


図 1.4: 世界中のトカマク装置のトロイダル磁場コイル電源用エネルギー蓄積要素の比較。小型トカマク装置ではキャパシタを、中型から大型トカマク装置ではフライホイールを用いる傾向がみられる。また磁場コイルに超電導コイルを用いる装置では電力蓄積要素を持たずに電力系統から直接受電する。

しかし以上のようにフライホイールに利点がある一方で、従来より小型装置ではキャパシタが用いられている。様々な理由が挙げられるが、最も重要な問題は発電機の存在と考えられる。キャパシタとフライホイールというエネルギー蓄積要素同士を比べれば圧倒的に密度が高いフライホイールであるが、電力として取り出すためには運動エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機が必須である。しかし従来トカマク装置用に使用されている直流発電機や同期発電機 [11–15] は構造が複雑で摺動部であるブラシの保守点検が必要といった問題点があった。小型装置ではそのような装置を持たずに電気エネルギーを電流として直接取り出すことが可能

なキャパシタが好まれてきた。

以上のようにキャパシタに比べてフライホイールはエネルギー密度が高いにもかかわらず、容易にパルス電源に適用が可能な小型発電機が入手困難であることから、小型トカマク装置では専ら比較的エネルギー密度の低いキャパシタバンク方式が採用されてきた。そこで本研究ではトカマク電源装置の大幅な小型化を目的として、これまで小型装置向け磁場コイル電源において利用が敬遠されてきた発電機に注目し、小水力発電や風力発電への応用で近年研究が進められている自励誘導発電機を利用してパルス電源の構築を行った。誘導電動機の中でも特にかご形誘導電動機はその構造の簡単さから産業用途で広く用いられており、それを発電機として使用することでブラシの保守が不要な発電機が構成可能である。誘導機を発電機として利用するときには、任意電圧を発生できる三相インバータを誘導機に接続することで回生を行い電力を取り出すことも可能である [16]。しかし大容量化に際して主回路部分に半導体スイッチング素子を用いる三相インバータは過負荷耐量が小さく、最大発電電力に合わせた設計が必要なため大型な三相インバータが必要といった問題があった。そこでパルス運転であることを考慮して過負荷耐量が大きい自励キャパシタとダイオード整流器で直流を生成できる自励誘導発電機を用いて発電機からの電力の取り出しを行った。この直流を利用してコイル電流を制御するためにはスイッチング素子が必要となるが、6つのスイッチング素子が必要な三相インバータに比べて1つのスイッチング素子で主回路が構成可能なチョッパで電流制御を行うため、必要な半導体素子の容量は小さくなっている。さらにトカマク装置 PLATO 向け電源では変圧器を併用することでスイッチング素子の容量を半分以下にした。また誘導発電機は同期発電機と異なり並列運転が簡単であることから、モジュール化による増設・大容量化も可能となっている。実際に PLATO 用パルス電源では誘導発電機を2台並列にすることで製造コストの削減や1台あたりの装置重量の調節を行うえるようにした。また本装置は同様にパルス電力を必要とする加速器・強磁場実験装置・瞬低対策装置等の幅広い応用先に適用可能である。

## 1.5 本論文の構成

第1章では、核融合についての概要に触れつつ、本研究で対象としているトロイダル磁場コイル電源装置を含めてトカマク装置で必要とされる装置全般について概説した。第2章では、フライホイールと自励誘導発電機について、それぞれ他方式のエネルギー蓄積装置と発電機に言及しながらその原理について詳述する。第3

## 第 1 章 序論

---

章ではそれぞれトカマク装置 PHiX にフライホイール付き自励誘導発電機を適用した際の設計方法や実験結果を示す。(第 4 章と第 5 章については査読論文執筆中につき非公開。) 第 6 章では、以上の設計・試作・実験結果から得られるフライホイール付き自励誘導発電機の特徴・性能について総括し、結論とする。

## 第 2 章

# フライホイール及び自励誘導発電機の原理

本章ではエネルギー蓄積装置としてのフライホイールと運動エネルギー変換装置としての自励誘導発電機の特徴について述べる。まずトカマク装置 PHiX と PLATO それぞれにおけるキャパシタバンクを用いたトロイダル磁場コイル電源の概要を説明した後、フライホイールと発電機について詳細を説明する。フライホイールは過去の研究により広く実用化や検討がなされているエネルギー蓄積装置である [10, 17–20]。また自励誘導発電機は自然エネルギー利用のために小水力発電や風力発電の分野において多くの研究がなされている [21, 22]。一方、本研究は特にフライホイール付き誘導発電機を単体で動作する自励発電機として運用することに着目した新しい電源方式についての研究である。

## 2.1 他方式の実績・検討

### 2.1.1 PHiX の高電圧キャパシタバンク電源

図 2.1 は 2014 年までに PHiX で使用されていた高電圧キャパシタバンク電源である。2.2 に示すように高電圧キャパシタバンク電源は最大 0.3 T を励磁することが可能であり、支持構造表面に歪みゲージを取り付けて装置製作時の強度試験が行われた。また再初期のトカマク放電のために用いられていた。

PHiX 装置立ち上げ時期であったことから、トロイダル磁場コイル電源にはまず最も簡単な回路方式、すなわちスイッチ投入のみで運転が可能な高電圧キャパシタバンク方式が採用された。高電圧キャパシタバンク電源にもクローバ回路等の比較的長いフラットトップを得られる方式がある。しかし回路が複雑で素子数が多いこと、失敗すると装置を破損する恐れのあるタイミング制御が必要なことから PHiX では単一の半導体スイッチのみで放電が実施された。

通電素子としては IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) が選ばれた。従来は高電圧大電流を扱うためにはイグナイトロンといった放電管が必要であったが、近年の半導体技術の発展により半導体素子でも PHiX の 0.3 T 運転に必要な耐圧 4.5 kV、耐電流 1.2 kA であれば調達可能であったことから IEGT が採用された。ただし半導体素子はターンオフ (電流遮断) をするとサージ電圧やスイッチングロスが発生するため、PHiX のトロイダル磁場コイル電源では、遮断能力がある IEGT でも通電中はターンオフしない、すなわち一度通電を開始したら高電圧キャパシタが完全に放電し切るまでスイッチを切り離さない運用を行った。高電圧

キャパシタ方式により、最大トロイダル磁場コイル電流は平均トロイダル磁場が 0.3 T となる 1.2 kA、フラットトップ時間はほとんどなく、トカマク通電に利用可能な時間は 50 ミリ秒程度であった。この電源により歪みゲージを用いたトロイダル磁場コイル強度試験や初期のマイクロ波 ECR (Electron Cyclotron Resonance、電子サイクロトロン共鳴) 放電が行われた。

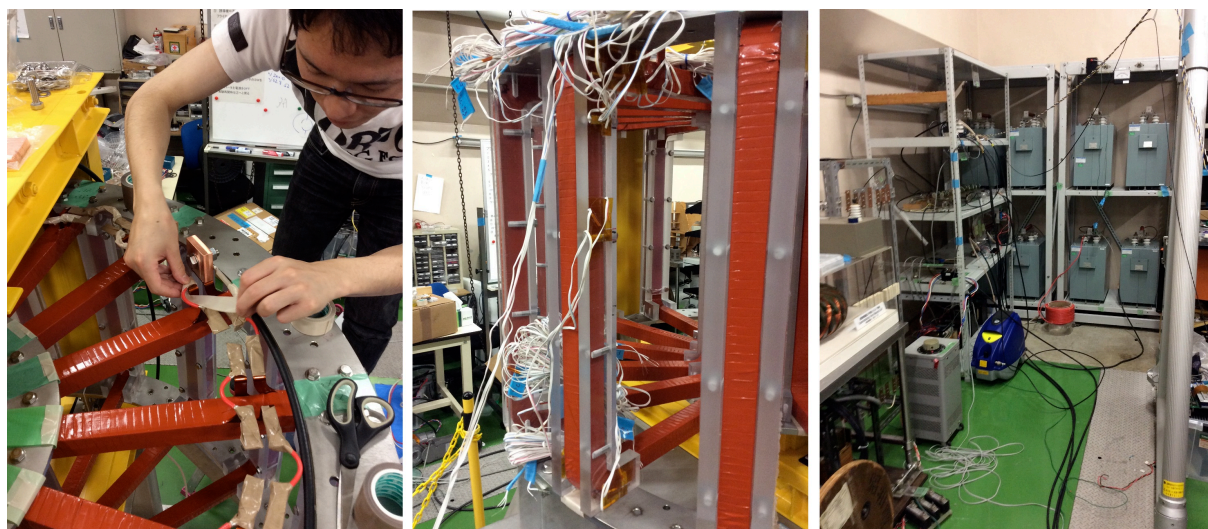


図 2.1: PHiX のトロイダル磁場コイル及び高電圧キャパシタバンク電源。トロイダル磁場コイルはすべて直列に接続されている。

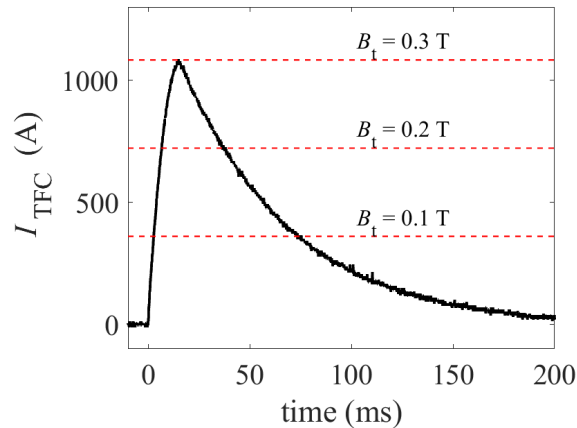


図 2.2: 高電圧キャパシタバンクを用いたトロイダル磁場コイル通電波形。真空容器中心  $R = 0.3 \text{ m}$  において平均トロイダル磁場  $B_t = 0.3 \text{ T}$  を発生する。LC 回路となるので十分なフラットトップは得られない。

## 2.2 エネルギー蓄積装置としてのフライホイール

### 2.2.1 電力貯蔵装置の重要性

瞬間的に電力を利用するパルス電源では一時的なエネルギー蓄積装置を備え付けることが多い。理由としては以下の 4 つが挙げられる。

1 つ目の理由は、エネルギー蓄積装置がない場合にはパルス電源の最大容量は受電設備の容量や契約電力によって制限を受けるからである。配電盤や分電盤には遮断器が取り付けられており、一定以上の電力を消費すると遮断器の特性に応じて回路は遮断される。また大規模な設備は別途電気会社の契約により受電できる最大容量が制限される。もしパルス電源がエネルギー蓄積装置を持たずに電力系統から直接電力を受電する場合、中間に位置する受電用変圧器や開閉器等は十分大きな設備を設けなければならない点である。パルス電源であることを考慮して小容量・小型化を目指す場合、変圧器等の過負荷運転による温度上昇を考慮することで配線の過電流による温度上昇や焼損を防ぐことは可能である。しかし変圧器等の小型化を達成しても変圧器や配線に起因する電圧降下の問題が残る。変圧器や配線は抵抗や漏れインダクタンスを有しており、交流電流が通過するときにはこの抵抗やインダクタンスによる電圧降下により、負荷端での電圧が不足することが考えられる。

一般的な製造方法では変圧器の漏れインダクタンスは数%の単位インピーダンスを有している。すなわち定格電流を通過させたときの単位インピーダンスだけの電圧降下が発生することを意味する。例えば単位インピーダンスが5%の場合、定格電流時の電圧降下は定格電圧の5%、2倍の定格電流で運転すれば10%の電圧降下が引き起こされることが分かる。設備の構成にもよるが、受電設備用変圧器や制御盤内の昇圧用変圧器のように必要な変圧器は複数台になることもあり、過負荷運転では電圧降下の問題により電源装置に必要な電圧が不足することが考えられる。この場合、負荷の直近に電力貯蔵装置を設けることで以上の問題を解決できる。

2つ目の理由としては事故時の安全性が挙げられる。エネルギー蓄積装置から電力を供給する構成にしておけば、断路器や遮断機の故障等により回路の遮断に失敗しても蓄積されたエネルギー以上は負荷に流れることはない。また特にフライホイールエネルギー蓄積装置を用いる場合、電気回路での短絡事故が発生した場合に発電機の動作を停止することで、エネルギーをフライホイールに残した状態で負荷側への電力供給を停止することができる。

3つ目は電力システムへの擾乱を防ぐことができる点である。電源装置が発生する高調波電流や急峻な負荷電流の変動は周辺設備に対して高調波や瞬低といった悪影響を与えることになるため、電力貯蔵設備があることでフリッカー対策や発電端の発電機軸保護につながる。また電力会社との契約により高調波電流を抑制する必要がある場合もある。

4つ目の利点としては、電力貯蔵装置を用いれば負荷端での電源電圧をある程度調整可能である点が挙げられる。一般に電力系統の受電端の電圧は操作することは不可能であるが、独自運用する電源装置であれば実験ショット毎にある程度自由に電圧を設定できる。

以上の説明のように、設置に費用・面積を必要とするエネルギー貯蔵装置ではあるが、パルス電源が必要とする短時間・大容量の電力を供給するためにはそのコストを超えるメリットが存在する。第1章でも述べたように、契約電力が小さい設備でトカマク装置のような需要率が著しく低い装置を運転するには一時的に電力を蓄える電力貯蔵装置を設置することが一般的である。比較的短時間・高出力のパルス電源が求められるトカマク装置用電源において実用されているエネルギー蓄積装置としてはキャパシタバンク方式とフライホイール方式が挙げられる。小型のトカマク実験装置はキャパシタバンクを使うことが多い一方で、スイス連邦工科大学ローザンヌ校にあるトカマク装置 TCV やチェコ科学アカデミープラズマ物理学研究所にある COMPASS な

どの中型程度の装置ではフライホイール電源を用いて磁場コイルを駆動している。JT-60 等のさらに大型な装置においても電力系統から受電しつつも実験時にはフライホイールエネルギー貯蔵装置と並列にして磁場コイルやプラズマ加熱装置の消費電力を賄っている。

小型装置にキャパシタバンクが好まれる要因としては、キャパシタバンクには機械的な保守点検が不要であること、キャパシタバンクの方が発電機に比べて出力インピーダンスが小さく瞬間的に高いピーク電力がとれるためと考えられる。発電機を使用した場合には出力される交流電圧の周期（50 Hz であれば 20 ms）以下の時間で電力を取り出すことは難しい。またある程度のリップルを持つ直流電流であればキャパシタバンクと 1 個のスイッチでも発生させることができる。しかしキャパシタバンクの価格はおよそ 1 MJ で 1 億円程度であり、また密度も低いことから広い設置面積が必要となる。そのためある程度大型の装置となるとコスト・設置スペースの問題から、発電機の保守に必要な手間を考えるとフライホイール付き発電機が有利となる。またキャパシタバンクに蓄えられるエネルギー  $E$  は、静電容量  $C$  とキャパシタ電圧  $V$  を用いて  $E = CV^2/2$  で表され、これはエネルギーの放出とともに必ず電圧が低下することを意味する。しかしフライホイールに蓄えられるエネルギー  $E$  は、フライホイールの慣性モーメント  $I$  と角回転数  $\omega$  を用いて  $E = I\omega^2/2$  で表され、電圧とは直接は関係ない式である。発電機の電機子または回転子の励磁を強めることで、ある程度は回転数が低下しても発電電圧を維持することが可能である。

本論文では、一般的に発電機として用いられる同期電動機に代わり、保守点検がほとんど不要で過負荷耐量に優れる誘導機を発電機として用いることで、小型装置である PHiX、PLATO においてもフライホイール付き発電機が十分に採用できることを明らかにした。

### 2.2.2 キャパシタエネルギー蓄積装置

キャパシタエネルギー蓄積装置は微視的視点で見た場合、真空または誘電体内の電界にエネルギーを蓄える装置である。誘電体材料の誘電率を  $\epsilon$  とすると、空間全体に蓄積されるエネルギーは

$$U = \iiint \frac{\epsilon E^2}{2} dV \quad (2.1)$$

と表される。また巨視的視点で見た場合は静電容量  $C$  をもつキャパシタに対して電荷を蓄積することを考える。すでに電荷が蓄積して電圧  $V$  が発生しているキャパシタに微小の電荷  $dQ$  を流入させるときに必要なエネルギー  $dE$  は

$$dU = VdQ \quad (2.2)$$

と表させる。キャパシタが線形素子であるとすれば、キャパシタ内の電荷がゼロの状態から  $Q$  になるまで充電するとき、キャパシタに蓄積されるエネルギーは

$$U = \int_0^Q VdQ = \int_0^Q \frac{Q}{C}dQ = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CV^2}{2} \quad (2.3)$$

となる。

### 2.2.3 フライホイールエネルギー蓄積装置

フライホイールエネルギー蓄積装置 (Flywheel Energy Storage System: FESS) は円盤状の回転体を加速して運動エネルギーとしてエネルギーとして蓄える装置である。円盤が大きくまた重いほどトルクを加えても角回転数に変動しにくい、すなわち慣性モーメントが大きくなり回転運動の平滑化の作用が大きくなる。また慣性モーメントが大きいほど同じ回転数に達するまでに大きいトルクを長い時間加えること、すなわち多くの運動量・運動エネルギーを蓄えることができる。

慣性モーメントは回転体の形状と密度によって決定されるものであり、一般的な形状・密度に対しては

$$\iiint \rho r^2 dV \quad (2.4)$$

で表される。ただし  $\rho$  は密度、 $r$  は回転軸からの距離、 $dV$  は微小体積である。慣性モーメント  $I$  が与えられた時に、フライホイールへの仕事  $P$  と蓄積されるエネルギー  $E$  は以下のようにして計算される。フライホイールの慣性モーメントを  $I$  ( $\text{kgm}^2$ ) とすると

$$P = T\omega = I\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (2.5)$$

で求められる。よって停止状態から  $t$  秒後の蓄積エネルギーは

$$U = \int_0^t P dt = \int_0^t I\omega \frac{d\omega}{dt} dt = \frac{1}{2} I\omega^2 \quad (2.6)$$

となる。ちなみに、工業的には  $GD^2(\text{kgfm}^2)$  と呼ばれる非 SI 単位系・物理量で慣性モーメントを表すことが多いが、本論文では SI 単位系に統一する。

特に一様密度  $\rho$  の円盤の場合、 $z$  軸方向にとる厚さを  $t$ 、半径を  $a$  とすると

$$I = \int \rho r^2 dV = \int_0^a \int_0^{2\pi} \int_0^t \rho r^2 dz r d\theta dr = \frac{\pi \rho a^4 t}{2} \quad (2.7)$$

で表される。蓄積エネルギーと慣性モーメントは比例であるから、同一材質でフライホイールを作る場合、半径の 4 乗に比例して蓄積エネルギーが増えることになる。ただしただ単に半径を大きくするとフライホイール全体の質量が大きくなる。ベアリング設計やコストの見積もりのために質量が一定での設計を考え、上式に追加の条件であるフライホイールの質量  $M = \pi \rho r^2 t$  を適用すると、

$$\frac{\pi \rho a^4 t}{2} = \frac{a^2 M}{2} \quad (2.8)$$

となる。すなわち、質量が一定の同一材料でフライホイールを作る場合、半径の 2 乗に比例して蓄積エネルギーが増えることになる。このとき質量一定であるから半径が大きいほど厚さが薄いことになる。質量  $M$  は支持ベアリング構造の設計において重要な値でもあるから、実際の設計ではこの式が重用される。

また式より角回転数の二乗に比例して蓄積エネルギーが増加することから、同一フライホイールでも回転数を大きくすることで蓄積エネルギーが増大することがわかる。ただし回転数は回転機（誘導機・同期機）やベアリングの定格で定められているため、寸法設計に比べて設計の自由度はそれほど大きくない。

## 2.2.4 フライホイールの設計限界

以上のようにフライホイールの半径を大きくするほど蓄積エネルギーが増大することが分かった。しかし半径を大きくするほどフライホイール材料内に働く引張応力が大きくなることから、半径にも上限が存在する。円盤状のフライホイール内に発生する応力は以下のように表させる [23]。

$$\sigma_r = \rho \omega^2 \frac{3+\nu}{8} \left( a_1^2 + a_2^2 - r^2 - \frac{a_1^2 a_2^2}{r^2} \right) \quad (2.9)$$

$$\sigma_\phi = \rho \omega^2 \frac{3+\nu}{8} \left( a_1^2 + a_2^2 - \frac{1+3\nu}{3+\nu} r^2 - \frac{a_1^2 a_2^2}{r^2} \right) \quad (2.10)$$

ただし  $a_1$  と  $a_2$  はそれぞれフライホイールの内径と外径であり、 $\sigma_r$  と  $\sigma_\phi$  はそれぞれ中心からの位置  $r$  における半径方向と周回方向の応力である。また  $\nu$  は材料固有のポアソン比である。半径方向と周回方向のどちらの応力も中心において最大となり、 $a_1 \ll a_2$ 、すなわち内径が外径に比べて十分小さいとき

$$\sigma_{\max} = \rho\omega^2 \frac{3+\nu}{8} a^2 \quad (2.11)$$

となる。したがって角回転数の上限は

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{8\sigma_{\max}}{\rho(3+\nu)a^2}} \quad (2.12)$$

と表される。ただし  $\sigma_{\max}$  は設計上許容する最大応力である。許容する最大応力として降伏応力を考えるとき、一般構造用圧延鋼材 SS400 は厚さが 100 mm を越えるとき  $\sigma_{\max} = 205$  MPa、 $\nu = 0.3$  となる。また機械構造用炭素鋼 S45C は焼きならし後において  $\sigma_{\max} = 345$  MPa、 $\nu = 0.25$  となる。上式より、SS400 に比べて S45C を採用した場合の許容角回転数は 1.3 倍、エネルギーにして 1.7 倍となる。

以上では材料と寸法からフライホイール内に発生する応力を計算したが、以下では材料と回転数から寸法を決定する例を示す。軸受け（ベアリング）や回転機の特性によって最高周波数が制限されるとき、その最高周波数から計算される設計可能なフライホイールの半径の最大値  $a_{\max}$  は

$$a_{\max} = \sqrt{\frac{8\sigma_{\max}}{\rho(3+\nu)\omega_{\max}^2}} \quad (2.13)$$

となる。

### 2.2.5 フライホイールの共振周波数

フライホイール単体の構造による回転数の上限の他に、図 2.3 の用にフライホイールエネルギー貯蔵装置にはフライホイールと発電機回転子からなる二慣性系によるねじり共振周波数による回転数上限が存在する。この共振周波数に相とする回転数に達すると軸のねじりが大きくなりフライホイール装置が破損する可能性がある。以下のように、フライホイール付き発電機をフライホイールと発電機の二慣性系と考えた軸のねじりによるねじり共振周波数を求める。軸のねじりにくさを表すねじり剛性  $k$  [Nm/rad] は

$$k \text{ [Nm/rad]} = \frac{\pi d^4}{32l} G \quad (2.14)$$

で表させる。ただしここで  $d$ 、 $l$ 、 $G$  はそれぞれ軸の直径、長さ、せん断弾性係数である。したがって共振周波数  $\omega_r$  (rad/s) は

$$\omega_r \text{ (rad/s)} = \sqrt{k \left( \frac{1}{I_{\text{gen}}} + \frac{1}{I_{\text{FW}}} \right)} \quad (2.15)$$

で表される。これがフライホイール付き発電機の定格回転数よりも高ければ十分である。

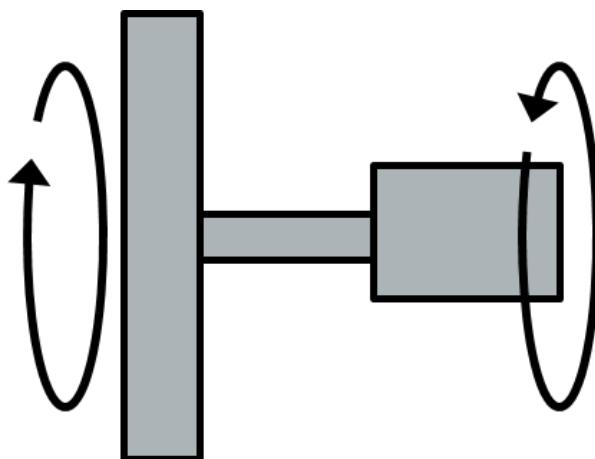


図 2.3: フライホイールと回転子による 2 質量系とねじり共振

## 2.3 誘導発電機

### 2.3.1 同期発電機との比較

トーマス・エジソンやニコラ・テスラらによって動力が電化がされたころから発電機は利用されていた。直流発電機を行っていたエジソン率いるジェネラル・エレクトリック社では直流発電機を用い、テスラを中心としたウェスチングハウス社では交流同期発電機が利用されていた。どちらも蒸気機関から機械動力を得て電力を発生させる装置であるが、電流戦争と呼ばれる直流交流の争いは交流側の勝利に終わり、今日の発電機はほとんどが交流同期発電機である。電流戦争に負けた直流発電機ではあるが、その始動トルクの大きさから電気機関車や電車に広く用いられていた。しかし直流機は摺動部があり頻繁なメンテナンスが必要なことから、また近年のパワーエレクトロニクスの発達により電気機関車や電車でも誘導機や永久磁石同期機機といった交流

電動機が広く用いられるようになっている。誘導機は同期発電機の着想と同時期にニコラ・テスラによって考案された。誘導機の種類としては大別して巻線形誘導機とかご形誘導機に分類されるが、かご形誘導機は三相交流電源を接続するだけで容易に始動・運転が可能であるから現在でも換気扇・ポンプ・その他負荷側動力源として産業界で非常に広く用いられている。

また発電所や非常用発電機用の発電機としては図 2.4 に示すような同期発電機が用いられることが多い。同期発電機は励磁電流の大きさを調整することで発生する無効電力が調整できる同期調相機としてはたらしきを持っており、負荷側で無効電力を消費する電力系統の安定化に寄与することができる。しかし電機子（回転部、誘導機の回転子に相当する）に巻線構造が必要であること、また電機子に電力を供給するための摺動部（ブラシ）が必要であることから同期発電機は同規模の誘導電動機に比べて装置寸法が大きくなる傾向にある。

本研究では一般的に負荷側として用いられる誘導機をパルス電源の発電端として利用することを提案している。従来より小水力発電や風力発電において誘導機を発電機として用いる研究がされているが、励磁電流を電力系統から供給されており単独運転が不可能なものが多い。三相インバータによって励磁電流を供給し、同時に有効電力を回収するブレーキ回生を行い電力を取り出す方式もあるが、発電機の全電力が三相インバータを通過するために三相インバータも負荷側の最大消費電力に合わせた設計が必要であり、インバータが大型化する問題がある。そこで本研究では図 2.5 のようにインバータを用いずにキャパシタにより励磁電流（無効電力）を供給することで端子電圧を発生させる自励誘導発電機を用いてパルス電源の設計・製作を行った。これにより制御が不要で過負荷耐量が非常に大きいダイオード整流器またはオンオフのみを行うサイリスタ整流器を用いて直流電圧を生成する方法が可能となった。

これによりフライホイールを採用しながらも複雑で保守点検が必要な同期発電機や高度な制御が必要なベクトル制御を用いずに簡便に電力を取り出すことが可能となった。

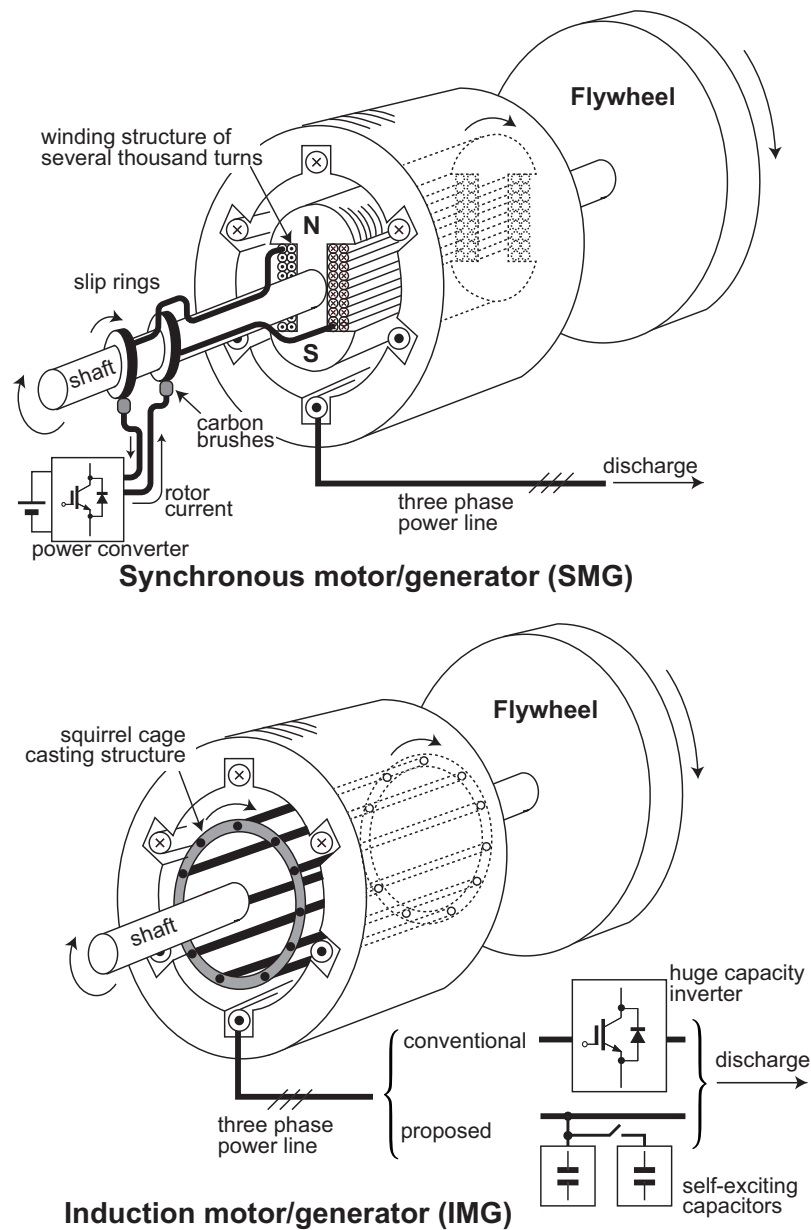


図 2.4: 同期発電機と誘導発電機の構造の違いを示したイラスト [24]。従来は同期発電機を用いたフライホイールエネルギー蓄積装置が一般的であるが、励磁回路や摺動部が必要とった問題点があった。誘導機では 1 次側の電力変換器や自励キャパシタによって 2 次側（回転子）の励磁電流を制御する。

また誘導機は産業用途で広く用いられていることから、用語・運転条件・試験方法等が電気学会電気規格調査会にて規格がまとめられている。かご形誘導機は2次側の電流経路が内部で短絡していることから、すべての特性は1次側の印加電圧と電流によって計測される。等価回路を決定するためには誘導機の回転軸を何も接続せずに行う無負荷試験や回転軸を固定して通電する拘束試験等を行う。これら試験で得られた結果を基に等価回路を決定する手法についてもまとめられている。

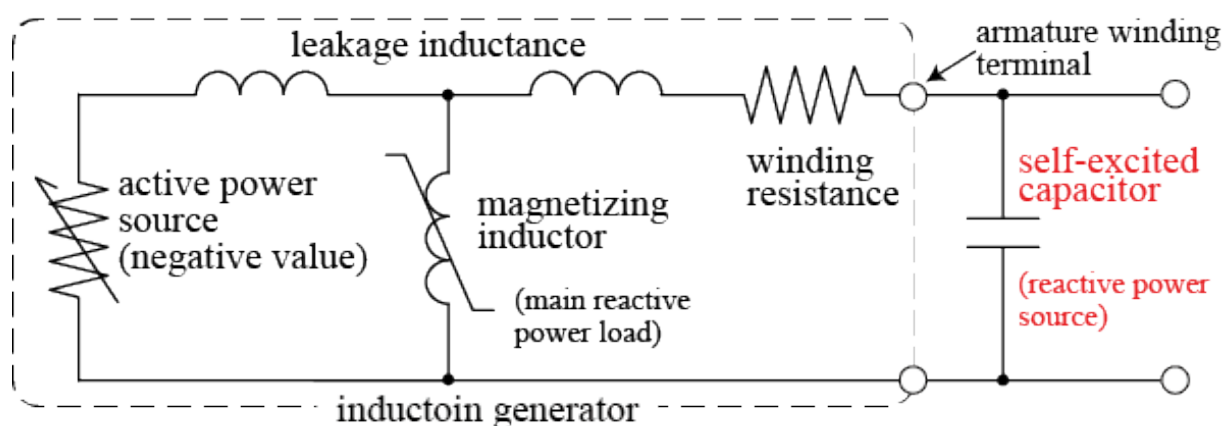


図 2.5: 自励現象を表現するための定常等価回路。誘導機の T 形等価回路に自励キャパシタを接続する構成になっている。

### 2.3.2 PHiX におけるインバータ式フライホイール付き誘導発電機

前述の高電圧キャパシタ式電源はフラットトップ時間が非常に短いことから、ポロイダル磁場コイル電源との同期、放電前にマイクロ波でプラズマを十分に加熱する予備電離が困難といった問題があった。さらに高電圧キャパシタは碍子の縁面放電を防ぐための定期的なメンテナンス、高圧部の隔離といった運用上の問題点もあった。そこで PHiX では 2015 年～2017 年にかけて低圧（600V 以下）で運用可能でかつ長時間運転が可能なインバータ式フライホイール付き誘導発電機を使用した [16]。これは実験前にフライホイールに貯めた運動エネルギーを発電機で電気エネルギーに変換してトロイダル磁場コイルに通電する方式である。また発電機の端子電圧制御にはインバータのベクトル制御が使われているためインバータ式と呼んでいる。インバータに

よって生成された直流電圧から DC/DC 変換器の一種であるチョッパ回路を経由して一定電流を発生することで、一定のトロイダル磁場を発生することができる。

図 2.6 と図 2.7 はそれぞれ PHiX に用いられていたインバータ式誘導発電機制御装置の外観と主回路構成である。この制御装置とフライホイール装置によって構成されたインバータ式フライホイール誘導発電機を用いることで、PHiX は図 2.8 の実験波形が示すように 0.1 T の平均トロイダル磁場を 1 秒以上発生することができた。平均トロイダル磁場が 0.1 T のとき、2.45 GHz のマイクロ波と電子サイクロトロン共鳴する共鳴層を生成する 0.0875 T の領域が真空容器内に存在するため、このトロイダル磁場を与えた状態で 2.45GHz マイクロ波を入射するとマイクロ波 ECR プラズマを生成することができる。

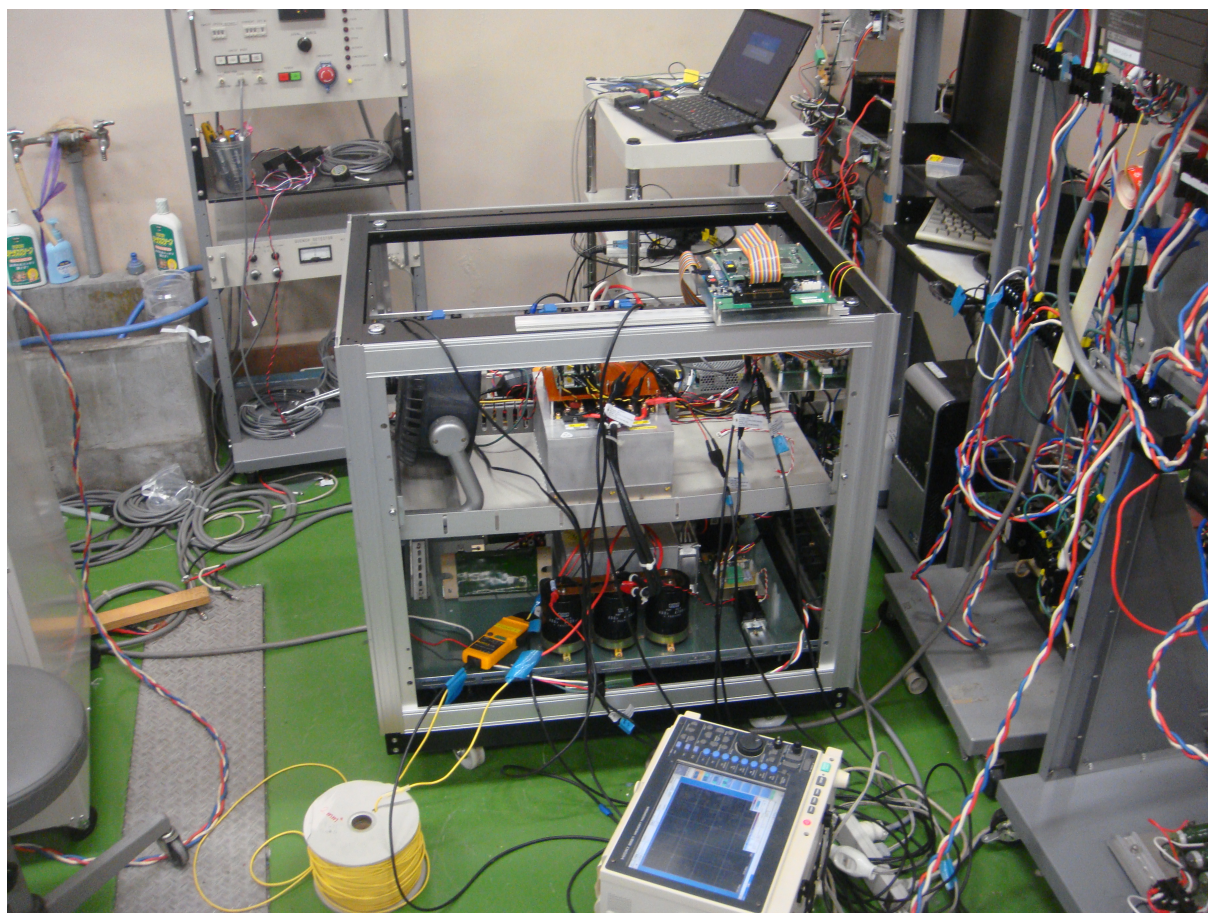


図 2.6: PHiX トロイダル磁場コイル用ベクトル制御インバータの外観

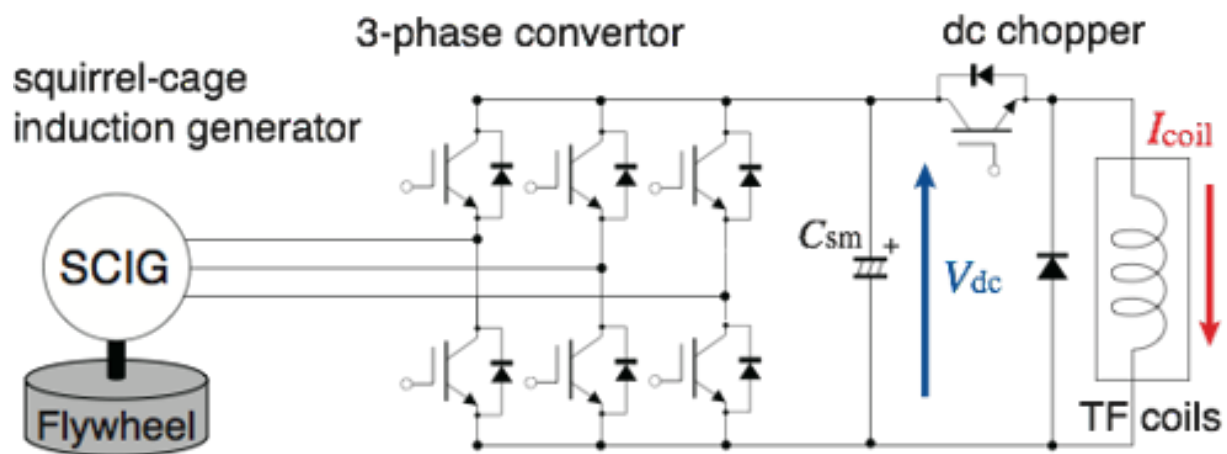


図 2.7: PHiX トロイダル磁場コイル用ベクトル制御インバータの主回路図 [16]

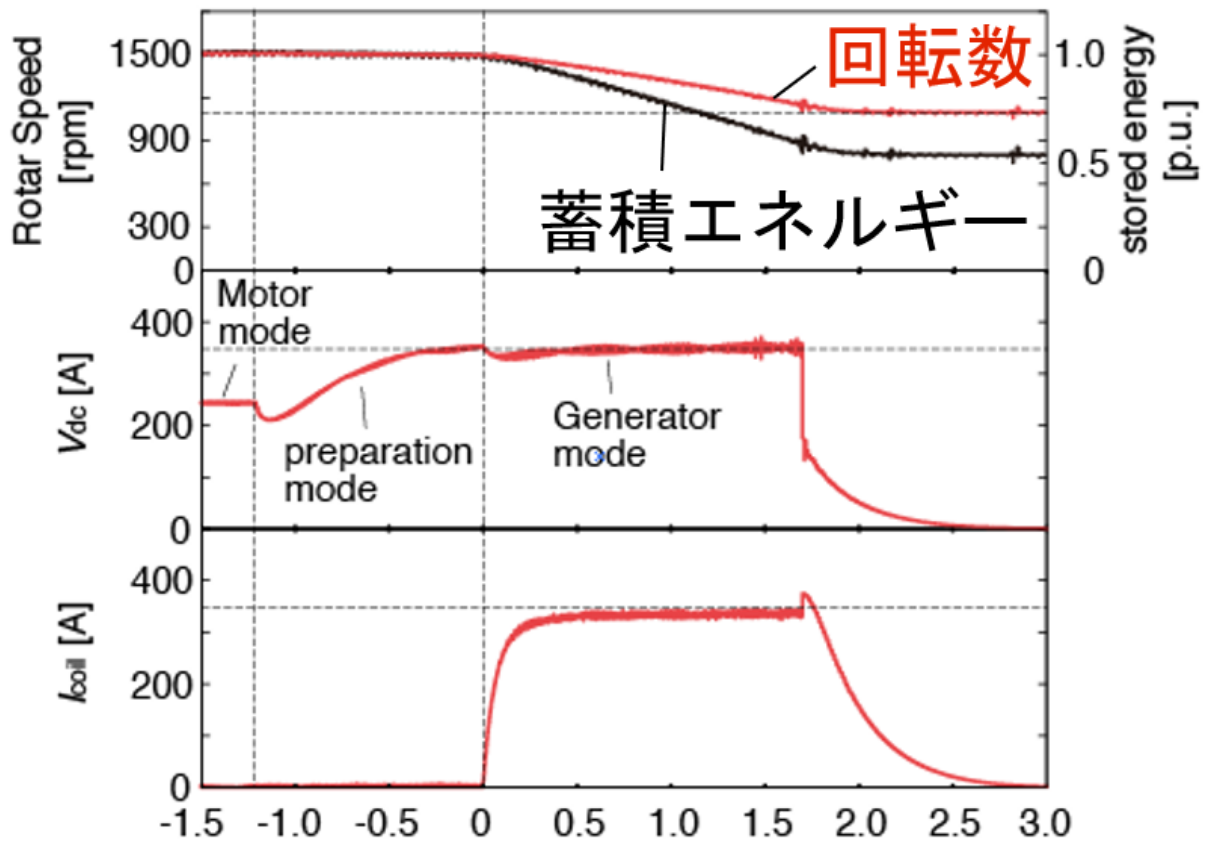


図 2.8: PHiX トロイダル磁場コイル用ベクトル制御インバータの運転波形

### 2.3.3 フライホイール付き誘導発電機によるパルス電源の構成例

誘導発電機は交流電圧を出力するが、負荷であるトロイダル磁場コイルに必要とされるのは外部からの指令値に応じて精密に制御された直流電流である。そのため発電機とトロイダル磁場コイルの間には電力変換器が必要となる。また磁場コイルの運転に必要な電圧が発電機電圧以下であれば図 2.9(a) に示す最も簡単なダイオード整流器（交流直流変換器）とチョップ回路（直流直流変換器）のみで回路を構成できる。しかし磁場コイルが発電機出力電圧以上の電圧を必要とする場合には何らかの方法で電圧を昇圧する必要がある。図

2.9(b) は変圧器によって絶縁しつつ変換器を直列にすることで供給可能な電圧を上昇させている。図 2.9(c) は定常時の出力電圧は発電機の電圧以上にはならないが、直列にチョッパ回路を挿入することで立ち上げ速度を高速にしたものである。さらにチョッパではなく H ブリッジを採用したことで正負電源になっており、ポロイダル磁場コイル電源に適した回路構成である。立ち上げ時間を短くすることで実験を行うことができるフラットトップ時間を伸ばすことができる。トカマク装置 PHiX では図 2.9(a) の回路構成を、PLATO の設計では図 2.9(b) の回路構成を採用している。

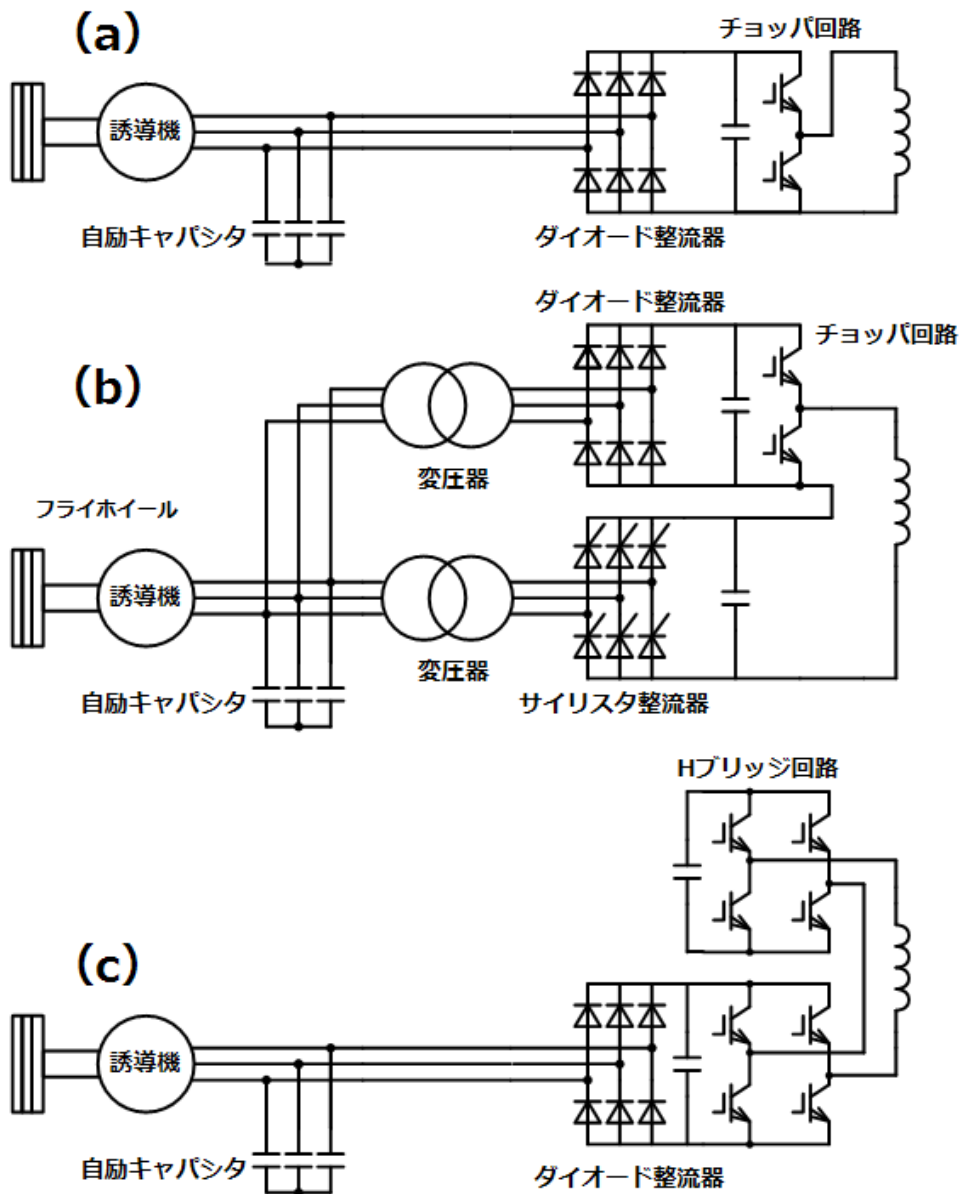


図 2.9: 自励誘導発電機とコイル負荷の接続方法例

### 2.3.4 電源回路中の無効電力源

ここでは誘導機の運転制御に重要な無効電力の定義について、古典的な時間積分によって定義する方法と時間に依存しない瞬間的な値だけで決定される瞬時虚電力によって定義する方法について説明する。

一般的に交流発電機に無効電力を供給すると機械出力であるトルクには直接影響がないにもかかわらず発電機の励磁電流を調整することが可能である。特にかご形誘導機の場合は 1 次側からの無効電力供給によるのみ 2 次側（回転子）の励磁電流が決定されるため、誘導機における無効電力潮流の制御は非常に重要である。一般的に電気回路中にキャパシタンス成分やインダクタンス成分が存在すると印加電圧と通過電流の位相がずれて無効電力が生じる。特に電圧・電流の正弦波の位相が互いに 90 度ずれた場合には電圧・電流共に非ゼロであっても三角関数の直交性により消費電力（積の時間積分）がゼロとなる。

素子に印加される正弦波電圧を  $v$ 、通過する電流を  $i$  としたときの古典的な無効電力  $Q$  の定義は以下の式を用いて求められる。

$$V = \frac{1}{T} \sqrt{\int v^2 dt} \quad (2.16)$$

$$I = \frac{1}{T} \sqrt{\int i^2 dt} \quad (2.17)$$

$$S = VI \quad (2.18)$$

$$P = \frac{1}{T} \int v i dt \quad (2.19)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.20)$$

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (2.21)$$

ただし、 $V$  は電圧実効値、 $I$  は電流実効値、 $S$  は皮相電力、 $P$  は有効電力（消費電力）、 $\lambda$  は力率である。 $T$  は印加されている電圧・電流の基本波成分の周期の整数倍であればよい。十分に長くすることで時間的な変動を取り除いて計測することも可能である。また非 SI 単位系も含めることになるが、皮相電力、有効電力、無効電力の単位はそれぞれ VA、W、var である。

電力潮流を議論する場合、定常状態であれば以上の定義式に拠る無効電力で十分に議論することができる。しかし定義式に積分演算が含まれることから交流の基本波周期程度の瞬間的な変動に対しては一義的で物理的

な意味を持つ瞬時値を計算することは不可能である。そこで 1983 年に赤木らによって三相交流回路における瞬時実電力と瞬時虚電力の定義がなされた [25]。これにより無効電力とは三相交流相間を流れる循環電力という物理的な意味を与えられ、また測定された瞬時値のみを利用した演算で求めることから、時間積分をせずに無効電力計算が可能である。また無効電力は三相交流相間を循環しているだけであるから、発電機や電動機のトルク成分としては外部に現れることはない。以下にその導出を示す。

三相平衡交流は互いに 120 度ずつずれた正弦波電圧・電流であるから、図 2.10 のように電圧・電流の瞬時ベクトルと u 軸・v 軸・w 軸を用いて表現することができる。例えば電圧の u 相・v 相・w 相成分  $E_u$ ・ $E_v$ ・ $E_w$  は電圧ベクトルの u 軸・v 軸・w 軸成分であるから、瞬時相電圧を数式で表すと

$$e_u = E_0 \sin \theta_v = E_0 \sin \left( \int_0^t \omega dt + \theta_{v0} \right) \quad (2.22)$$

$$e_v = E_0 \sin \left( \theta_v - \frac{2\pi}{3} \right) = E_0 \sin \left( \int_0^t \omega dt - \frac{2\pi}{3} + \theta_{v0} \right) \quad (2.23)$$

$$e_w = E_0 \sin \left( \theta_v - \frac{4\pi}{3} \right) = E_0 \sin \left( \int_0^t \omega dt - \frac{4\pi}{3} + \theta_{v0} \right) \quad (2.24)$$

となる。ただしここで  $E_0$ 、 $\theta$ 、 $\theta_{v0}$ 、 $\omega$  はそれぞれ相電圧の波高値、u 相基準の位相、初期位相、瞬時角周波数である。電流についても同様にして

$$i_u = I_0 \sin \theta_i = I_0 \sin \left( \int_0^t \omega dt + \theta_{i0} \right) \quad (2.25)$$

$$i_v = I_0 \sin \left( \theta_i - \frac{2\pi}{3} \right) = I_0 \sin \left( \int_0^t \omega dt - \frac{2\pi}{3} + \theta_{i0} \right) \quad (2.26)$$

$$i_w = I_0 \sin \left( \theta_i - \frac{4\pi}{3} \right) = I_0 \sin \left( \int_0^t \omega dt - \frac{4\pi}{3} + \theta_{i0} \right) \quad (2.27)$$

で瞬時値を表すことができる。ただし  $I_0$ 、 $\theta_i$ 、 $\theta_{i0}$  はそれぞれ相電流の波高値、u 相基準の位相、初期位相である。

三相平衡交流の場合

$$e_u + e_v + e_w = 0 \quad (2.28)$$

$$i_u + i_v + i_w = 0 \quad (2.29)$$

の拘束条件があるため、 $\alpha$  相と  $\beta$  相の 2 成分で表すことができる。 $\alpha$  相と  $\beta$  相の瞬時値は u 相・v 相・w 相の

ときと同様にして。

$$e_{\alpha} = \frac{3}{2}E_0 \sin(\theta) = E_0 \sin\left(\int \omega dt + \theta_{e0}\right) \quad (2.30)$$

$$e_{\beta} = \frac{3}{2}E_0 \sin(\theta - \pi/2) = E_0 \sin\left(\int \omega dt + \theta_{e0} - \pi/2\right) \quad (2.31)$$

$$i_{\alpha} = \frac{3}{2}I_0 \sin(\theta) = I_0 \sin\left(\int \omega dt + \theta_{i0}\right) \quad (2.32)$$

$$i_{\beta} = \frac{3}{2}I_0 \sin(\theta - \pi/2) = I_0 \sin\left(\int \omega dt + \theta_{i0} - \pi/2\right) \quad (2.33)$$

で表される。ただし後述の内積・外積で有効電力・無効電力を表現するときに uvw 相と  $\alpha\beta$  相のどちらで議論しても電力が保存するように  $\sqrt{3/2}$  が掛けられている。

本論文で扱う瞬時有効電力  $p$  と瞬时无効電力  $q$  は以下のようにして定義する。図 2.11 のように  $\alpha\beta$  相の瞬時電圧ベクトルと瞬時電流ベクトルをそれぞれ

$$\mathbf{e} = [e_{\alpha} \ e_{\beta}] \quad (2.34)$$

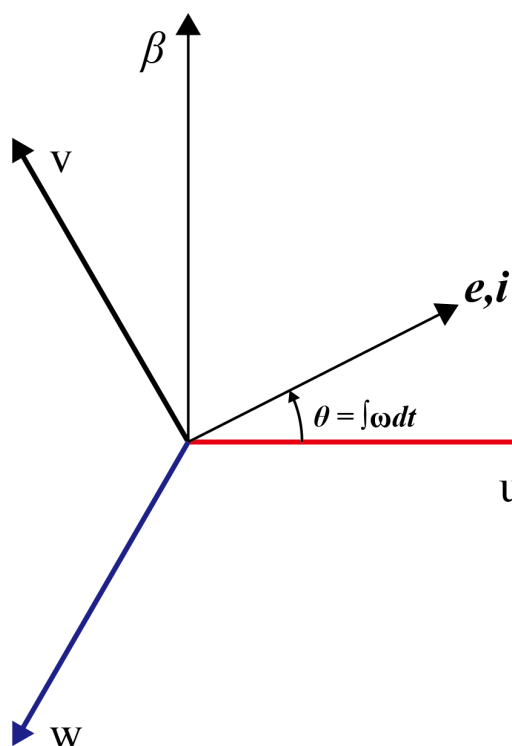
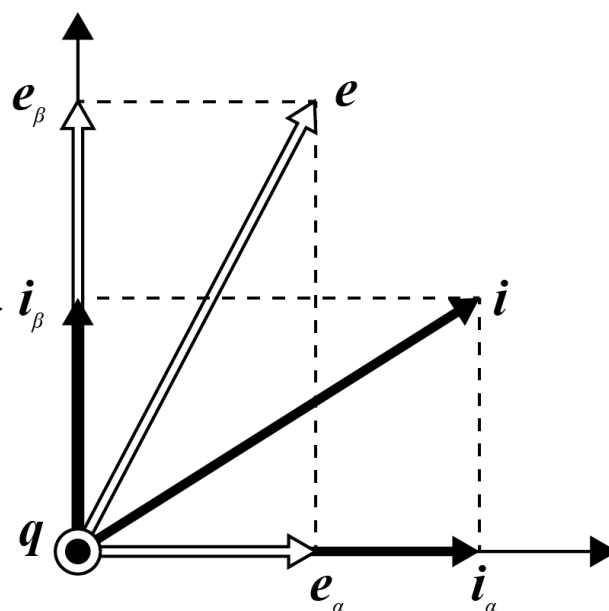
$$\mathbf{i} = [i_{\alpha} \ i_{\beta}] \quad (2.35)$$

と表すと、

$$p = \mathbf{e} \cdot \mathbf{i} = e_{\alpha}i_{\alpha} + e_{\beta}i_{\beta} \quad (2.36)$$

$$q = \mathbf{e} \times \mathbf{i} = e_{\alpha}i_{\beta} - e_{\beta}i_{\alpha} \quad (2.37)$$

となる。この論文では無効電力の定義は赤木らによる瞬時虚電力に則り、従来の進み無効電力が電流の正方向に流れることを正としている。そのため母線から素子の方向へ電流を正にとると、三相交流母線に進み無効電力を供給する場合に無効電力が正となる。

図 2.10: uvw 相と  $\alpha\beta$  相の関係図 2.11:  $\alpha\beta$  相電圧・電流への分解

ところで三相交流回路がダイオード整流器等の交流直流電力変換器に接続されている場合を考える。前述のように素子に印加される交流電圧と通過する交流電流に位相差が存在すると無効電力が発生する。三相ダイオード整流器は通過する電流は理想的には矩形波電流であり、電圧と電流の基本周波数成分の位相は一致することから無効電力は発生しない。しかし実際には図 2.12 のように配線インダクタンスによる転流遅れが存在することから矩形波の立下りが遅れることで電流位相の遅れ、すなわち遅れ無効電力が発生させることになる。

この場合の電力潮流について、変換器内で相間の循環電力が流れていると考えることで変換器前後を切り離して無効電力を考えることができる。すなわち、無効電力は変換器を越えないと表現できる。本論文ではダイオード整流器を用いて発電機による三相交流を直流に変換している。そのため転流による無効電力が発生する。

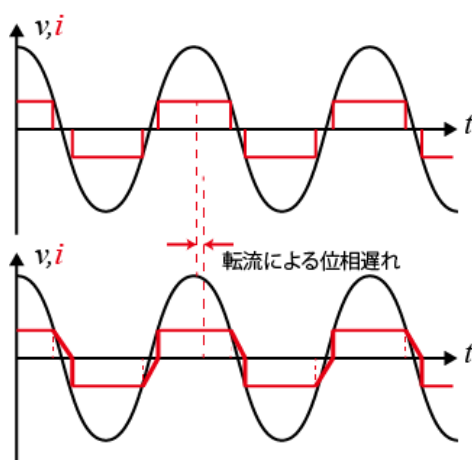


図 2.12: ダイオード整流器電流の転流時の波形。電流は矩形波・台形波であるから高調波成分を含んでいる。また転流重なり角が発生すると電流の位相が電圧に対して遅れることで遅れ無効電力成分が発生する。

### 2.3.5 自励誘導発電機の原理

回転機のキャパシタ自励現象は同期機・誘導機に関わらず広く知られた現象である [26]。特に同期発電機における自励現象は発電機端子電圧の意図しない上昇を引き起こすことから避けるべき現象として説明されることが多い。また電力系統の線間容量により起こるフェランチ現象は容量負荷（キャパシタ成分）によって引き起こされる自励現象と言える。このように普段は発生させるべきではないキャパシタ自励現象だが、以下の点からパルス電源として非常に優れた特性を持っている。

- 図 2.13 のようにキャパシタを接続・切断するだけで自励現象の度合いを調節できる。このとき使う素子は機械式コンタクタなど信頼性やコスト面で安定した製品を使用できる。
- 市販の誘導機が適用できる。特に誘導機の製品ラインナップは定格電圧・定格容量の範囲が広く、必要とされる規模に応じた設計が容易である。例として富士電機低圧三相モータ（プレミアム効率）のラインナップとして、定格電圧は 200 V・400 V・690 V、定格容量は 0.75 kW～375 kW までである。
- 誘導機は産業界で最も使用されている回転機である。そのため技術は成熟しており、さらにトップランナー方式採用により高効率化が押し進められている。

前述のようにかご形誘導発電機の発電電圧は外部から入力される無効電力によって決定される。誘導発電機の巻線抵抗や鉄損抵抗、配線抵抗等を見捨てると自励キャパシタから発生する進み無効電力と誘導発電機から発生する遅れ無効電力が釣り合うように電圧が決定することになる。自励キャパシタは飽和や高調波歪み等が起らず線形性に優れ、印加電圧と電流は直線の関係にある。

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (2.38)$$

しかし誘導発電機は定格電圧付近で誘導機内部で用いられる電磁鋼板、特にスロット先端部の歯部に磁束が集中して飽和するため、印加電圧を大きくすると徐々に通過電流が大きくなる傾向がある。誘導機に用いられている鉄心の磁気飽和特性を多項式で表すと [26]

$$I = k_{1/3} \left( \frac{E - E_R}{\omega/\omega_0} \right)^{1/3} + k_1 \left( \frac{E - E_R}{\omega/\omega_0} \right) + k_3 \left( \frac{E - E_R}{\omega/\omega_0} \right)^3 + \dots \quad (2.39)$$

で表される。そのため図 2.14 に示すようにキャパシタと誘導発電機の電流-電圧曲線の交点で定常状態となる。キャパシタの接続数を増やせば同じ印加電圧でも大きな電流が流れるため、曲線の傾きが大きくなり、2 曲線の交点が電圧・電流共に大きい方向へと移動する。以上のように接続するキャパシタ個数を変化させることである程度の電圧調整が可能である。

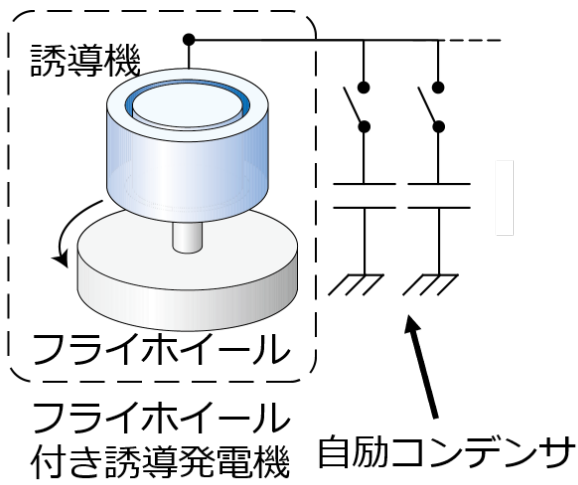


図 2.13: キャパシタ自励現象を引き起こす回路構成。回転する誘導機にキャパシタを並列に接続するだけで電圧が発生する。

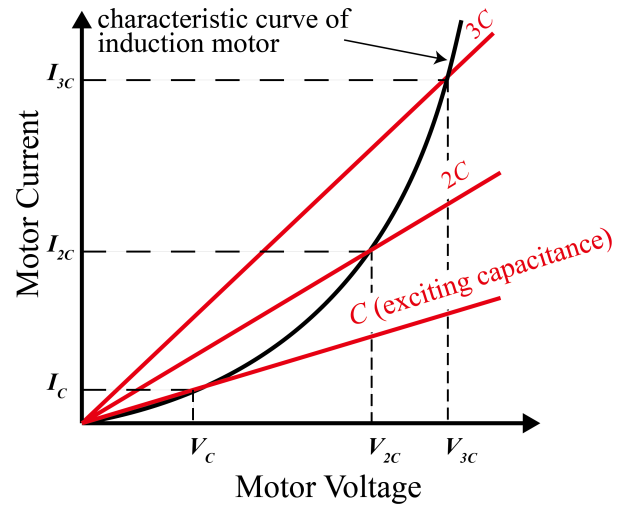


図 2.14: 誘導機と自励キャパシタの電流-電圧曲線。自励現象は 2 つの曲線の交点において安定となる。

## 2.3.6 運転方法

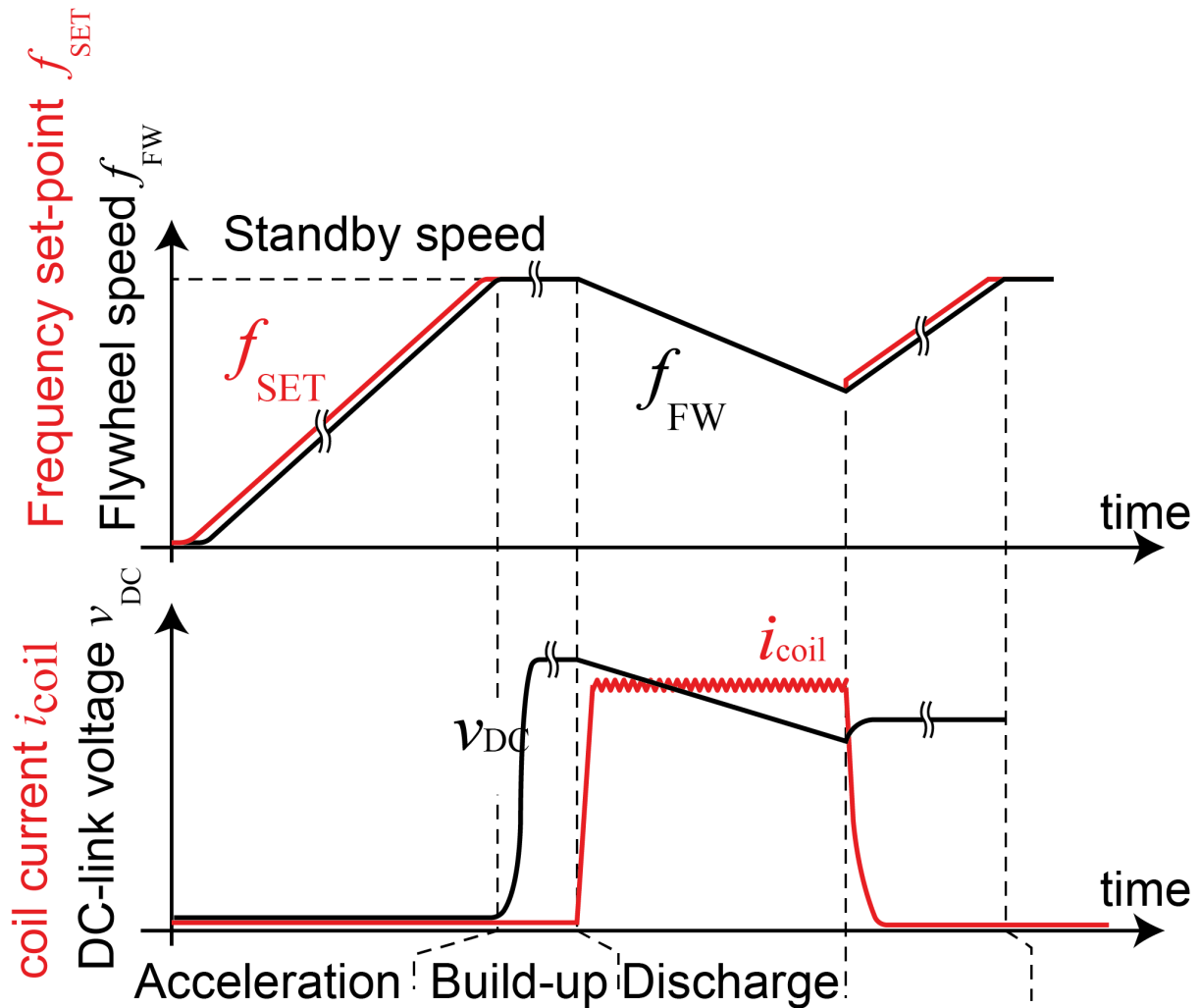


図 2.15: 自励誘導発電機の運転シーケンスの概要。大まかに加速充電・電圧ビルドアップによる通電待機・通電の 3 つのシーケンスからなる。

瞬間的に電力を供給するパルス電源として運用するため、図 2.15 に示す 3 つのシーケンス、すなわちフライホイールにエネルギーを蓄える加速充電動作、発電機を励磁していつでも放電ができるように待機する電圧

確立動作、負荷に電流を通電する放電動作に分けられる。

加速充電のシーケンスでは電力系統からフライホイールに徐々にエネルギーを供給してフライホイール回転数を上昇させる。パルス電源の負荷となる磁場コイルの電力は大きい、長時間かけて充電した後に短時間の通電を行うため系統からのピーク消費電力は負荷電力に比べて小さい。また回転数が大きくなるとフライホイールに蓄積されるエネルギーに加えて機械損・風損により待機電力が発生する。次の電圧確立のシーケンスでは誘導発電機から加速用三相インバータを切り離して自励キャパシタを接続する。これにより誘導機のキャパシタ自励現象が発生して発電機電圧が上昇する。しばらくすると誘導発電機と自励キャパシタが発生する無効電力がつり合って電圧上昇がとまり発電機電圧は定常状態の電圧確立となる。電圧確立後、通電命令を受け取ると放電シーケンスが始まり、コイル負荷に接続された電力変換器が動作してコイル負荷に電流が供給される。このときに消費されるエネルギーはフライホイールから供給されるため、フライホイールには減速方向のトルクが発生して回転数が減少する。

放電後は再び充電加速シーケンスを開始することでフライホイールの再加速が始まる。以上のようにして繰り返しのパルス通電が実行される。トカマク装置 PLATO では 3 分間に 1 回程度の頻度で、またトカマク装置 PHiX では 1 分間に 1 回程度の頻度で以上の運転シーケンスを繰り返す設計である。

### 2.3.7 成長率とペリオド

自励現象は正のフィードバックによって発生する現象であるから、発電機電圧が満たす方程式は

$$\frac{dv}{dt} = \lambda v \quad (2.40)$$

となる。実際には第 5 章にて解説する複数のモードの重なりで表されるため、 $\lambda$  は対角行列となる。しかし支配的に成長するモードは 1 つだけなのでここでは単一の定数  $\lambda$  を用いて議論する。発電機電圧は、この 1 階線形微分方程式の解である

$$v(t) = v(0)e^{\lambda t} = v(0)e^{t/\tau} \quad (2.41)$$

で表される。そのため誘導機のパラメータが一定のとき、発電機電圧の特徴は初期電圧成長率  $v(0)$  と成長率  $\lambda$  ないし時定数  $\tau$  で表現することができる。成長率  $\lambda$  が一定であれば最小二乗法を用いて実験で得られた発電機電圧に指数関数にフィッティングすることで成長率  $\lambda$  を計算することができる。しかし誘導機の鉄心磁束の飽

和により誘導機の特性は時々刻々と変化しているため、成長率  $\lambda$  を求めたい場合には瞬時値のみを利用して計算する必要がある。

そこで、原子炉出力の動特性を表示するために用いられるペリオド計 [27] の原理を応用して自励誘導発電機の動特性を表現した。原子炉におけるペリオド  $T$  とは、原子炉の出力と密接に関係する中性子束がある時刻の値から  $e$  倍または  $1/e$  倍になるまでの時間を指す。中性子束が増加している場合は正の値、減少しているときは負の値を取る。誘導機の自励現象と原子炉の核分裂連鎖反応はどちらも式 (2.40) で表される 1 階線形微分方程式を背景として持つため、同様の計測手法が適用可能である。成長率  $\lambda$  で表現しても等価であるが、物理量が増減するまでの時間を見積もるためにはペリオドを用いる方が容易である。

ある物理量  $y$  について、 $y$  のペリオド  $T$  は物理量の瞬時値  $y$  とその微分  $dy/dt$  を用いて

$$T = y \left( \frac{dy}{dt} \right)^{-1} \quad (2.42)$$

で表される。またグラフで描画するときの軸は定常状態で連続になるように逆数で表示することが多い。図 2.16 にペリオドの時間発展例を示す。左から順に正弦波・三角波・指数関数に対して式 (2.42) でペリオド計算した。  $t > 4$  s では  $y$  が指数関数で増加しているがペリオドは一定であり、指数関数状の時間発展特性を表現することに適していることがわかる。

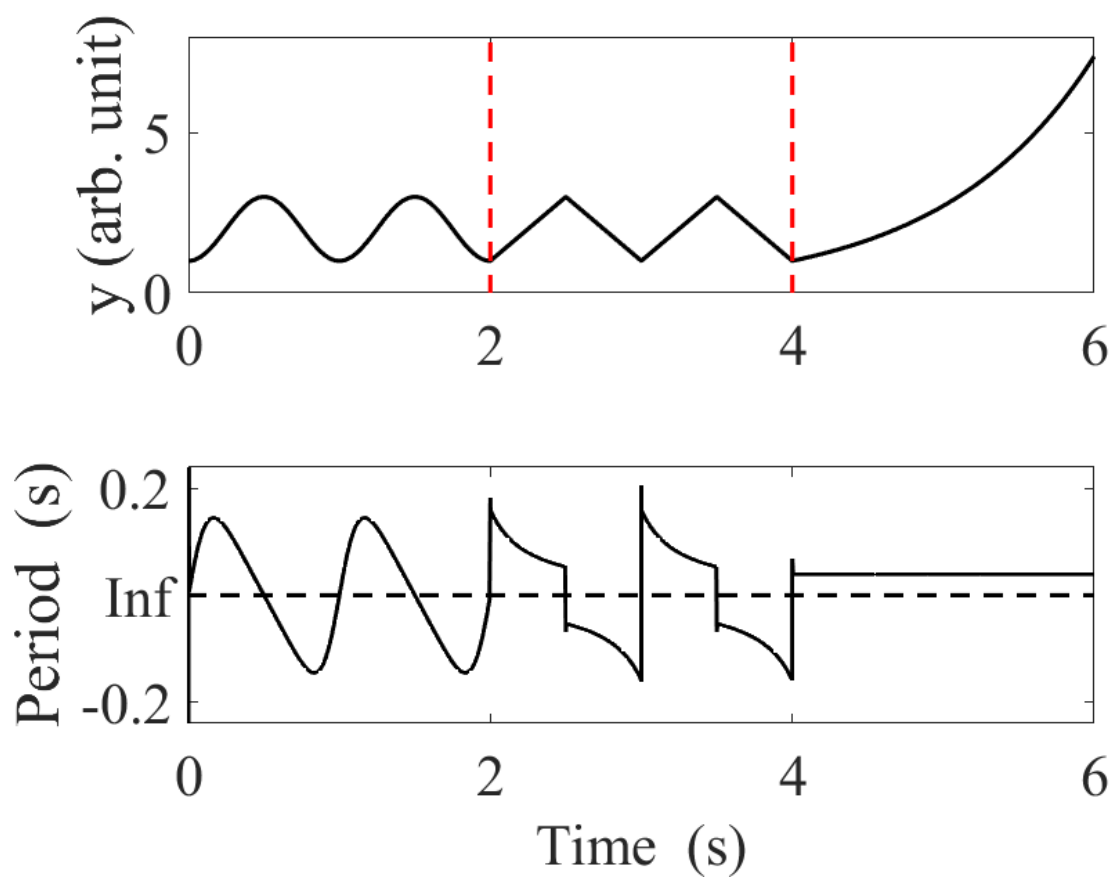


図 2.16: ペリオドの計算例。

## 第3章

# 非絶縁型自励誘導発電機直流パルス電源の 設計と実証実験

本章では要求される負荷コイル電圧が発電機電圧の階級と同等であるため、発電機にダイオード整流器を直接接続することで必要な直流電圧が得られる回路構成の設計と実証実験についてまとめた。本論文ではこの回路方式を非絶縁型自励誘導発電機直流パルス電源と呼称する。

## 3.1 トカマク装置 PHiX の概要

PHiX は縦長断面プラズマの垂直位置不安定性の抑制を目的として 2014 年 11 月 27 日にファーストプラズマ（初運転）が行われた装置である。装置の主要パラメータは表 3.1 にまとめた。装置の大きさを表す主半径は 0.3 m であり、トカマク装置としては小型に分類される。2019 年末時点においては位置形状制御実験を継続しながら、図 3.1 に示すように垂直位置不安定性を抑制するサドルコイル・ヘリカルコイルの改修やマイクロ波干渉計等の計測器の設置が進められている。図 3.2 は PHiX の運転に関係する周辺機器類を示す図である。真空容器の周りにトロイダル磁場コイル・ポロイダル磁場コイル（図 3.3）とそれらの電流を駆動する電源系、プラズマの予備電離に用いられるマグネトロン（図 3.4）が配置されている。PHiX では以上の電源装置とマグネトロンがプラズマの制御を行うアクチュエータとして動作する。電源装置とマグネトロンはコントローラ（制御装置）から与えられるシーケンス・指令値にしたがって運転を行う。予め電流指令値が決められているプレプログラミング運転ではトカマク装置の各種計測装置信号を用いずに運転するが、プラズマの位置や形状を制御する場合にはログスキーコイルやフラックスループ、ピックアップコイルといった計測装置からの信号を利用してフィードバック制御を行う。

PHiX のトロイダル磁場コイル電源の開発は高電圧キャパシタバンク期（2014 年～）、インバータ式フライホイール付き誘導発電機期（2015 年～2017 年）、自励式フライホイール付き誘導発電機期（2017 年～）と変遷している。最初期の PHiX では他の小型トカマク装置同様に高電圧キャパシタバンク放電によってトロイダル磁場コイルが励磁されていた。しかし高電圧キャパシタバンク放電ではフラットトップ時間が短く十分なプラズマ放電時間が確保できないことから、その後トロイダル磁場コイル電源はインバータベクトル制御を用いたフライホイール付き誘導発電機によって実験が行われていた。

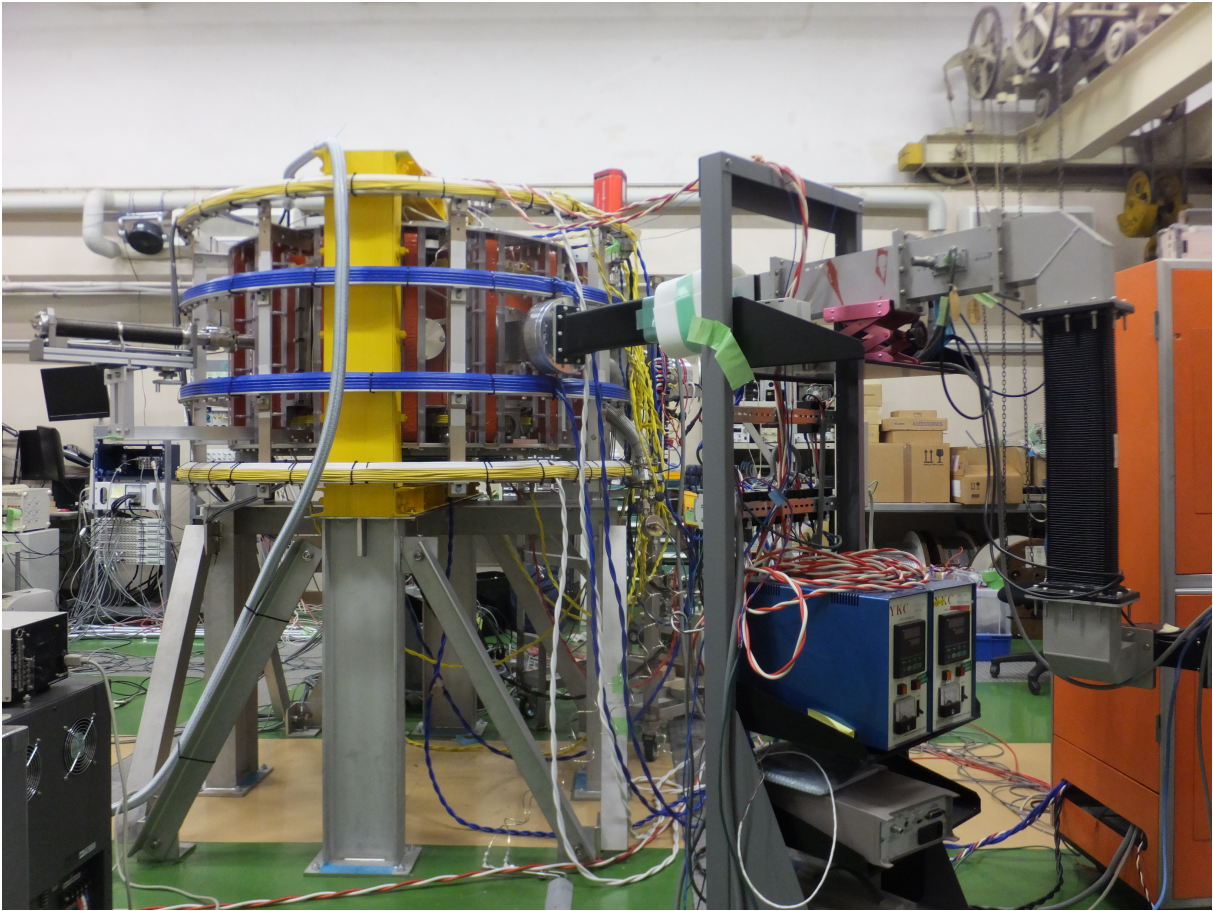


図 3.1: PHiX の装置外観。縦長断面プラズマの不安定性抑制を目的として 2014 年から運用されている。装置サイズとしては小型トカマクに分類される。

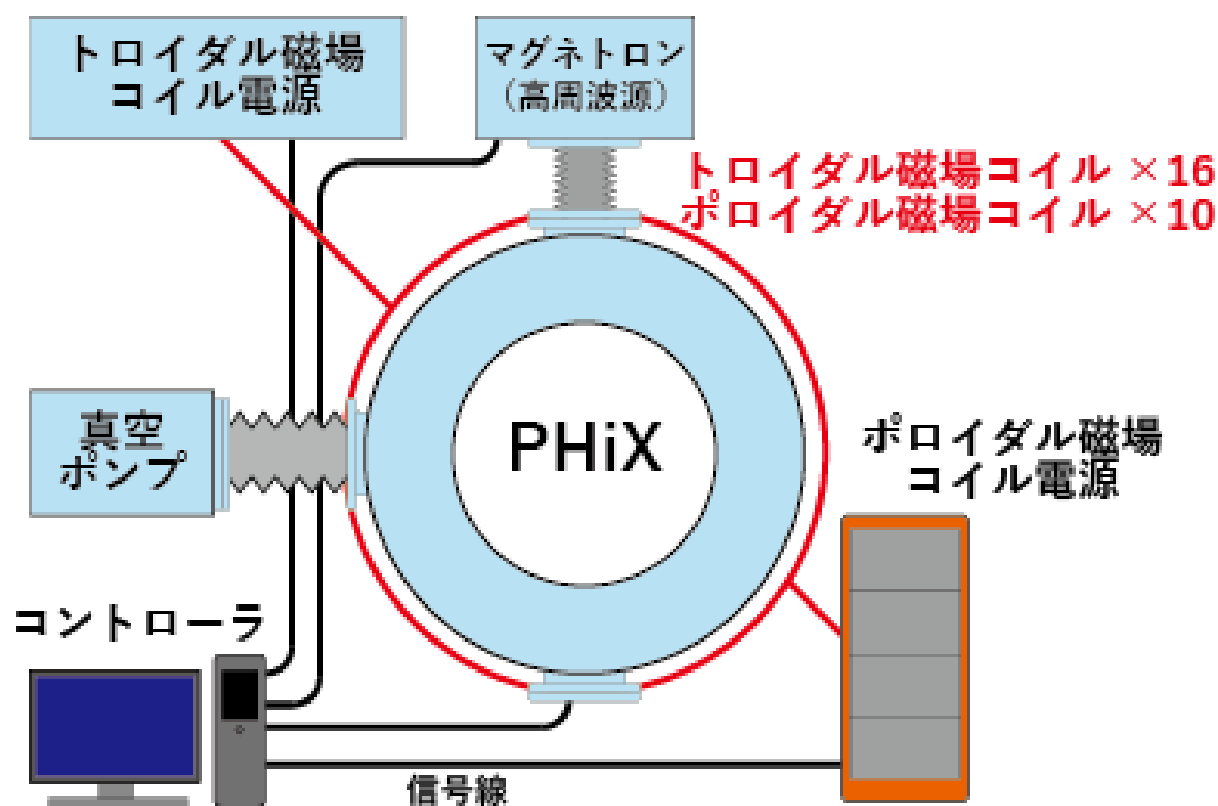


図 3.2: PHiX の周辺機器類。真空を維持するための真空ポンプ、コイル電源系、マグネトロン系、制御系からなる。

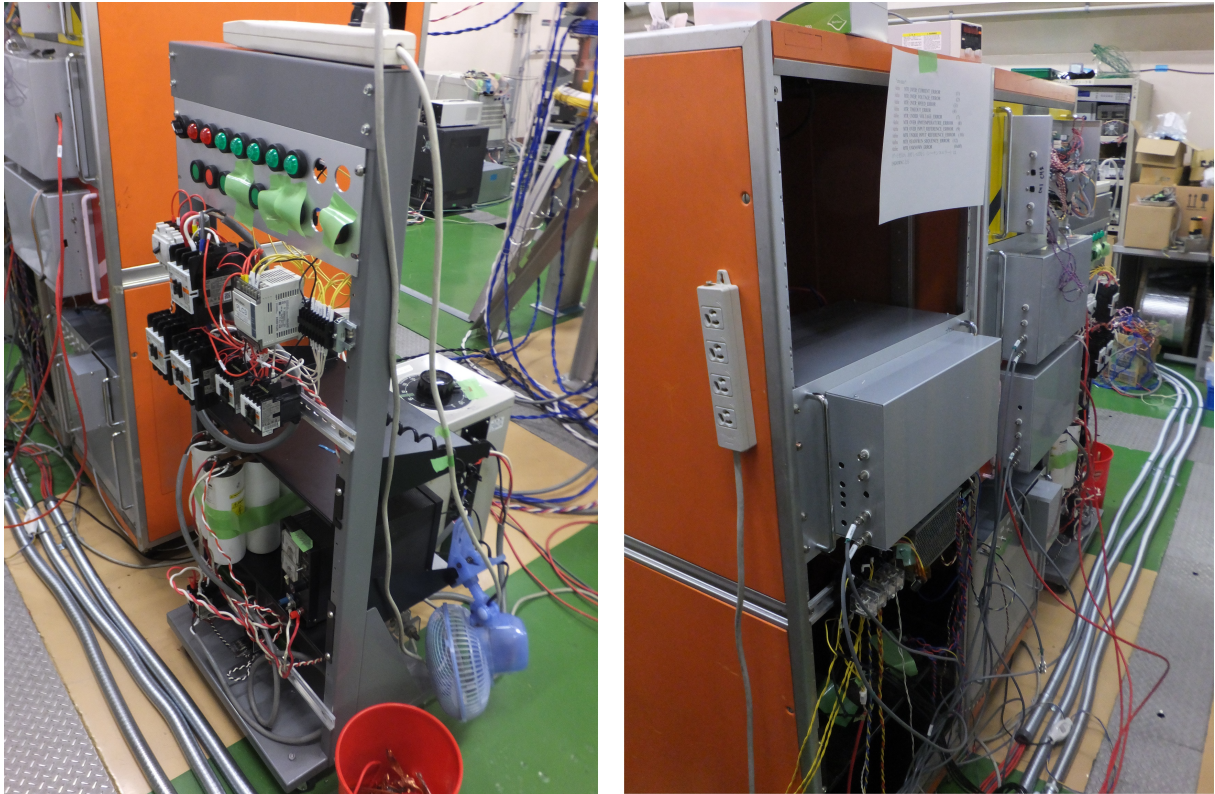


図 3.3: ポロイダル磁場コイル制御盤とポロイダル磁場コイル群。ポロイダル磁場コイル電源は多自由度が求められるため、複数台の H ブリッジインバータで運用されている。軽負荷試験で用いられたものもこのインバータである。



図 3.4: PHiX の予備電離用マグネトロン。2.45 GHz のマイクロ波を最大 5 kW で連続波 (CW) 出力することができる。トロイダル磁場による共鳴層がないときに真空容器へマイクロ波を入射すると内部が焼損する可能性があるため、トロイダル磁場コイル電源と同期して運転される。

表 3.1: PHiX の主要パラメータ

大半径 $R_0$	33 cm
小半径 $a$	9 cm
非円形度 $\kappa$	1.8
プラズマ電流 $I_p$	< 5 kA
トロイダル磁場 $B_t$	< 0.3 T
放電時間 $t$	< 5 ms
TFC 抵抗値 $R_{TFC}$	0.42 $\Omega$
TFC インダクタンス $L_{TFC}$	22 mH
TFC 電流 ( $B_t = 875$ G) $I_{TFC}$	347 A

### 3.1.1 自励式フライホイール誘導発電機期

インバータ式フライホイール誘導発電機は発電機の電圧制御にインバータのベクトル制御を使っていることからそれなりに高機能・高速なコントローラ（マイコン）が必要であり、さらに任意電圧を生成する必要があるため IGBT の高速スイッチングが必要となる。高速スイッチングは半導体素子内の発熱を起こすため、適切な熱設計が必要である。また負荷が必要とされる有効電力すべてがインバータを通過するため、インバータ容量（出力最大電圧と出力最大電流の積で表される）が大きくなりがちである。

そこで自励式誘導発電機では誘導機の自励現象により誘導機端子電圧を生成し、後段のダイオード整流器とチョップ回路により交流/直流変換を行っている。ダイオード整流器は制御が不要なため、三相交流を接続するだけで簡単に直流電圧を得ることができる。またスイッチングを行わないためインバータに比べて素子本体や放熱板の容積を非常に小さくすることができる。またダイオード整流器は IGBT に比べて過負荷耐量が非常に大きいことから、パルス電源としてはインバータ式誘導発電機よりも自励式誘導発電機の方が素子容量を小さくできる。半導体素子の発熱の増加は放熱板・冷却系の大型化に直結するため、制御盤床面積を決める際に非常に重要となる。一般的に電力変換器の素子選定には連続定格を用いるが、パルス運転を前提とした設計では短時間定格で設計が可能である。本論文ではこの自励誘導発電機的设计・製作・実験を行った結果について報告する。

### 3.1.2 PHiX のポロイダル磁場コイル電源

ポロイダル磁場コイルはトカマクプラズマの位置や断面形状を制御するために用いられるコイルである。制御工学では一般的に制御対象が変化する時定数よりも高速な応答を持つ制御器（アクチュエータ）で制御を行わなければならない。小型トカマク装置ではトカマクプラズマが移動する時定数は 0.1 ミリ秒から 1 ミリ秒程度であるから、電源装置の応答周波数（指令値が入ってからそれが反映されるまでの時間）もその程度でなければならない。そのためポロイダル磁場コイル電源はトロイダル磁場コイル電源に比べて応答性・精度の高い電源が要求される。

パワーエレクトロニクスの分野ではこのような電源装置の制御にはマイクロコンピュータ（マイコン）を用いるのが一般的である。小型トカマク装置 PHiX においても同様にマイコンを用いた制御基板を使って電源を製作している。マイクロコンピュータはルネサス・エレクトロニクス社の RX62T を使用している。比較的安価なマイクロコンピュータであるが割り込みや PWM 波生成、CAN 通信、AD 変換といった電源装置で必要となる各種機能が揃えられたマイコンである。ポロイダル磁場コイル電源ではマイコンからオン・オフの指令を受け取る IGBT と呼ばれる半導体スイッチング素子によって電圧・電流の制御が行われている。

## 3.2 直流パルス電源用自励誘導発電機の設計

PHiX はこれまでにインバータ式フライホイール付き誘導発電機を用いたトロイダル磁場コイル電源を運用してきた。しかし高速な半導体スイッチングが必要なベクトル制御を利用していたため、大容量化にあたり調達可能な大容量の半導体素子が限られていてこれ以上の大型化が難しいという問題があった。そこで誘導機のキャパシタ自励現象を利用した自励誘導発電機によるパルス電源の設計と製作を行った。これまで定常状態で利用する研究は広く行われていたが、磁場コイル電源用にパルス電源を構成する例はなかった。この節ではこのパルス電源の設計の手法について説明する。

### 3.2.1 PHiX 用フライホイールエネルギー蓄積装置

PHiX 向けパルス電源として図 3.5 で示した主回路構成を基本として設計・開発が進められた。誘導発電機は従来同様、表 3.2 に諸元を列記したフライホイール付き誘導発電機を利用した。使用した自励キャパシタ等の部品は表 3.3 にまとめているとおりである。

表 3.2: PHiX 用フライホイールエネルギー蓄積装置の概要

フライホイール	
材質	一般構造用圧延鋼材 SS400
円盤直径	640 mm
円盤厚さ	135 mm
慣性モーメント (SI 単位系)	17.9 kg m <sup>2</sup>
定格回転数	1,800 rpm
蓄積エネルギー	317 kJ at standby speed

誘導電動発電機 (定数は JIS-2110 に拠る)	
型番	三菱電機 SF-JRV
定格電圧	200 V
定格出力	55 kW
定格周波数	60 Hz
極数	4 (極対数: 2)
一次抵抗 $r_1$	15.6 mΩ
励磁インダクタンス $L_M$	5.17 mH
Iron loss resistance $r_M$	50.5 mΩ
一次漏れリアクタンス + 二次漏れリアクタンス (一次換算値) $l_t$	0.322 mH
鉄損抵抗 $r_M$	50.5 mΩ
二次抵抗 (一次換算値) $r_{2t}$	12.5 mΩ

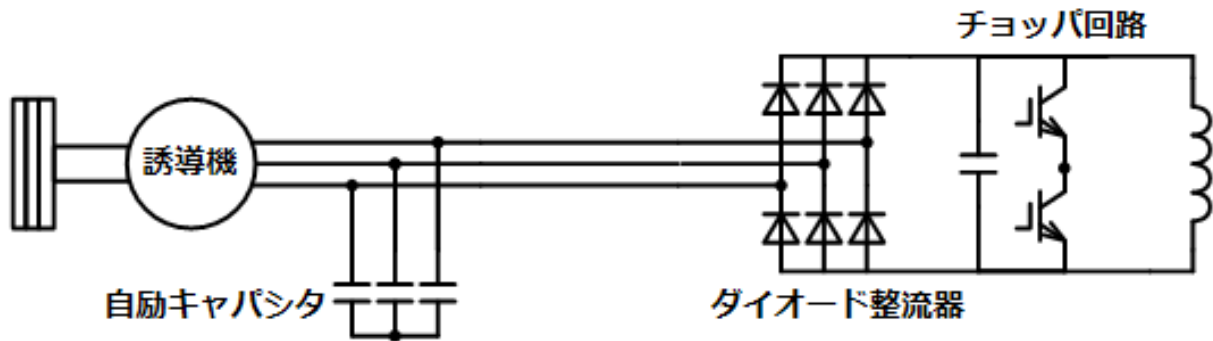


図 3.5: PHiX のポロイダル磁場コイルを用いた軽負荷通電試験の回路構成。

### 3.3 PHiX 用パルス電源の実験結果

#### 3.3.1 加速充電特性

フライホイールの加速は小容量の三相インバータによって行われる。本実験装置ではフライホイール本体に回転数計を取り付けて計測した回転速度を基に三相インバータが出力する周波数を決定する速度センサ付き V/f 制御と、図 3.6 に示すような上位の制御器となるシーケンサのフィードバック制御によって加速を行っている。外部から ON 指令を受け取ると、V/f 制御インバータは入力された周波数指令信号に応じて図 3.7 に示す電圧の三相交流を出力する。これにより正の滑り周波数が三相交流が印加されることでフライホイールを加速をすることができる。V/f 制御において滑り周波数を一定とすることで三相インバータの出力電流を定格電流値の上限でほぼ一定にしたまま加速が可能である。これにより三相インバータの定格範囲内で最短時間での加速が可能である。回転数上昇後は、三相インバータの指令値入力部分に周波数指令値の最大値を制限するリミタの働きにより到達後回転数はリミタ最大値で定常となり、待機状態となる。図 3.8 は加速試験の結果である。ブロック線図に記載された加速試験における制御パラメータについて、周波数加算  $\Delta f$  は 1.5 Hz、リミタの設定値は 60 Hz である。実験結果から、充電加速時の最大消費電力は 2.9 kW、待機状態の 0.57 kW、停止状態から定格回転数までの充電時間は 330 秒であることがわかる。また速度センサを備え付けているため、通電後にフリーラン状態で減速中の誘導機を途中から加速する拾い込み加速も可能である。

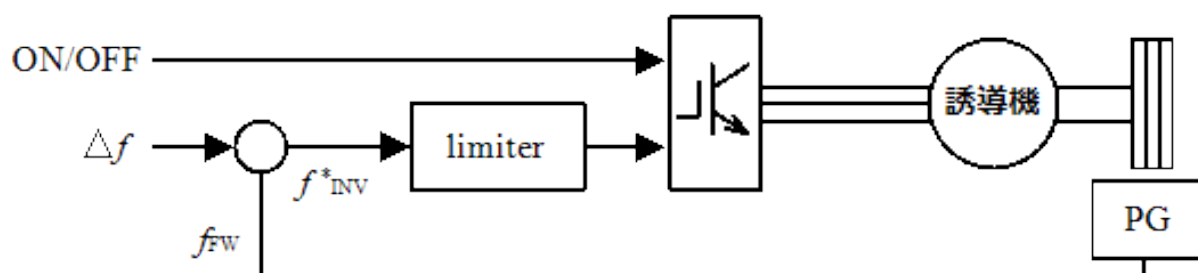


図 3.6: 加速制御のブロック線図。パルスジェネレータ (PG) から得たフライホイール回転数 (電気周波数換算) に定数を足した値を周波数指令値とする。加速充電完了時にはリミタにより指令値が定常となる。

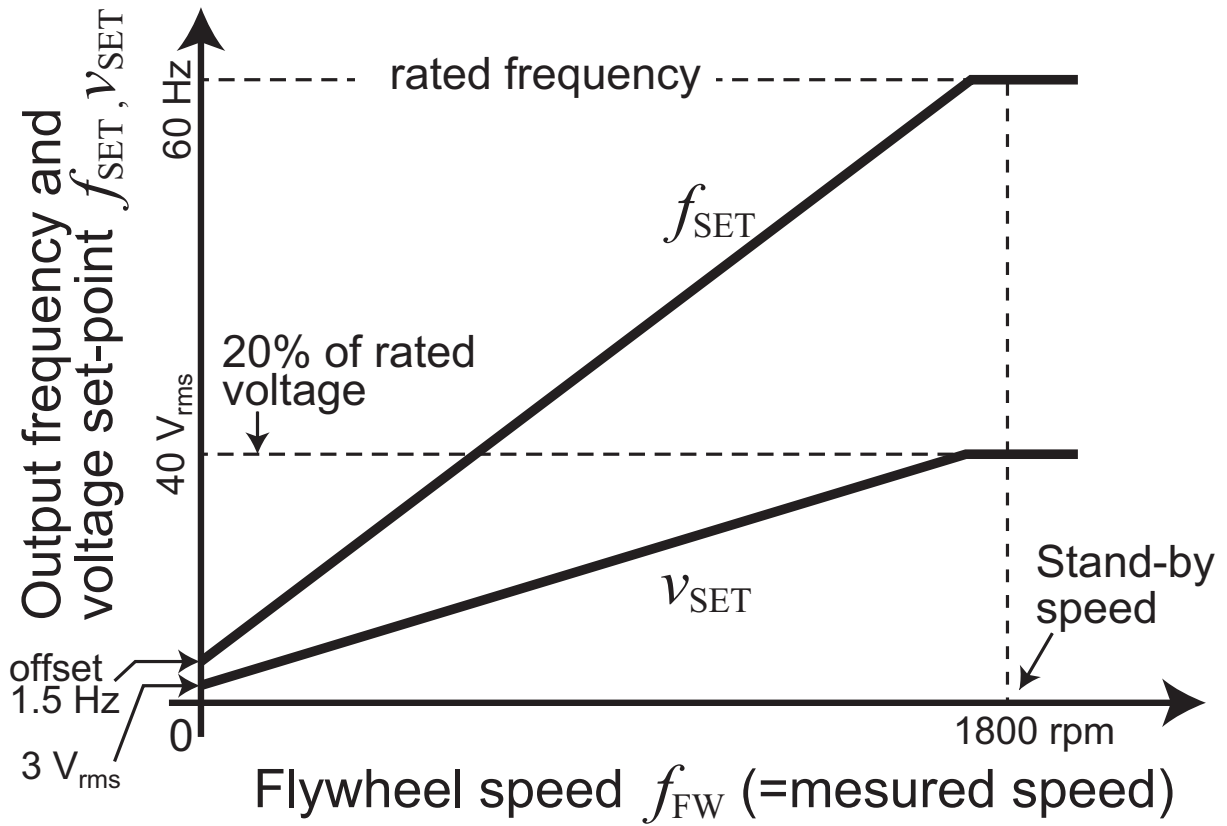


図 3.7: 加速用インバータの V/f 制御設定。一般には定格回転数で定格電圧を出力するように設定するが、加速出力は定格出力よりも小さいため電圧を低減した加速で十分である。

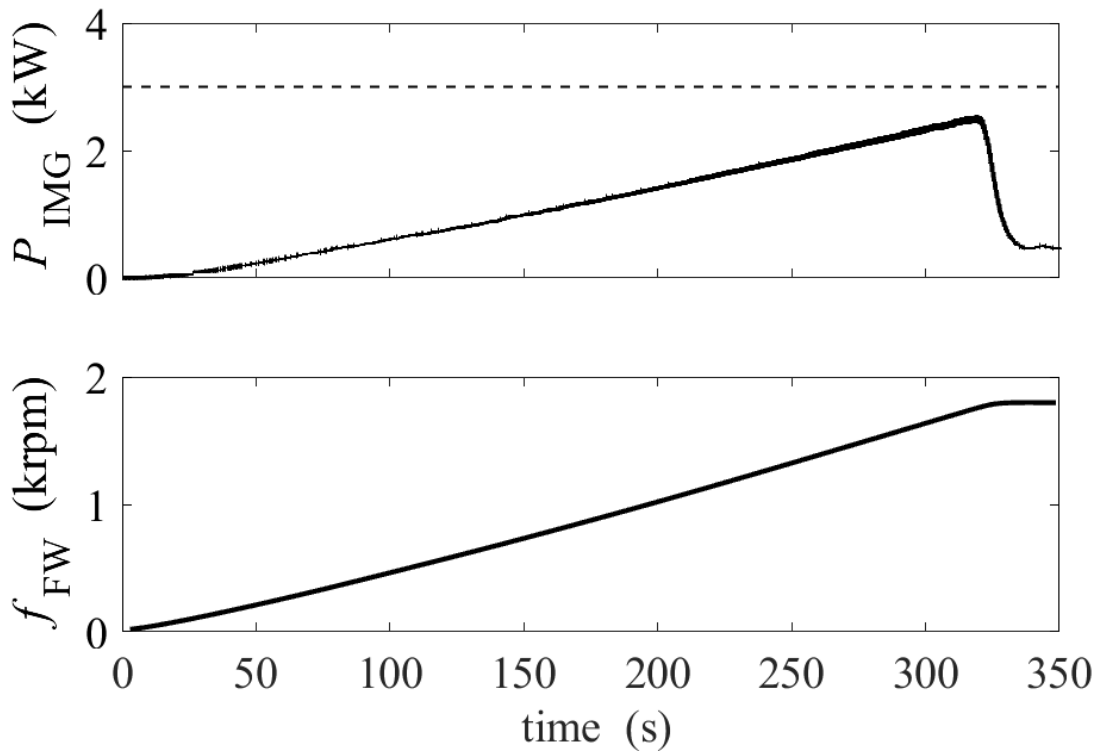


図 3.8: PHiX 用自励誘導発電機の充電加速波形

### 3.3.2 自励誘導発電機の電圧ビルドアップ特性

これまでに 3 つある運転シーケンスのうち 1 つ目の加速については動作を確認することができた。続いて充電加速停止後に自励キャパシタを接続して電圧を確立する電圧確立の動作確認を行った。自励現象は回転子の残留磁化や減速中の励磁電流が端緒となって発生する正のフィードバック現象である。そのため自励キャパシタの容量を増やしていくと、ある容量でそれまで減衰していた発電機電圧が成長して定常状態でも電圧が維持されるようになる。図 3.9 に示すように、 $t = 0$  で自励キャパシタを接続すると発電機電圧が上昇する。接続した自励キャパシタ容量が大きく、また回転数が高いほど自励現象が強く起こり、立ち上がり速度や到達電圧が高いことが分かる。接続した自励キャパシタ容量と定常状態での発電機電圧をまとめたものが図 3.10 であ

る。Y結線で1相当たり960  $\mu\text{F}$ の自励キャパシタンスを接続すると発電機電圧が成長して一定の電圧を維持するようになる。自励キャパシタ容量を増やすと発電機電圧は上昇して1200  $\mu\text{F}$ で定格電圧になる。さらに容量を増やすと1950  $\mu\text{F}$ で誘導発電機の定格電圧の130%に達する。発電機の過電圧は内部の故障につながるため、定常状態での測定は1950  $\mu\text{F}$ で終了としている。

負荷を接続して出力電流が増加した場合やエネルギーが取り出されてフライホイール回転数が減少した場合には出力電圧が減少するため接続する自励キャパシタの容量は大きいほうが好ましい。定常状態まで待機してから通電開始する場合には、およそ1950  $\mu\text{F}$ の範囲内で自励キャパシタを接続して電圧ビルドアップを行えばよいことが分かる。ただし、図3.9の3000  $\mu\text{F}$ を接続したときの波形のように、あらかじめ電圧確立から通電までのシーケンスが確定している場合にはビルドアップ途中での通電を許容することでさらに多くの自励キャパシタを接続することが可能である。またSSR (solid state relay)による追加投入が可能であれば、通電開始とともに自励キャパシタを追加することで電圧の維持が可能である。

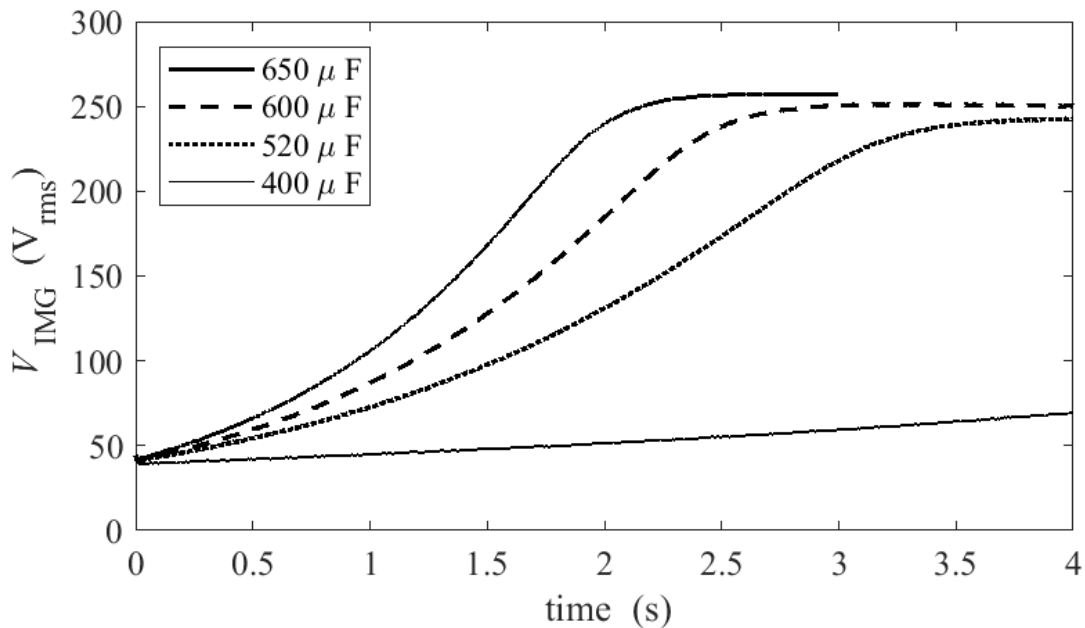


図 3.9: PHIX用自励誘導発電機のビルドアップ特性 (時間発展) [24]

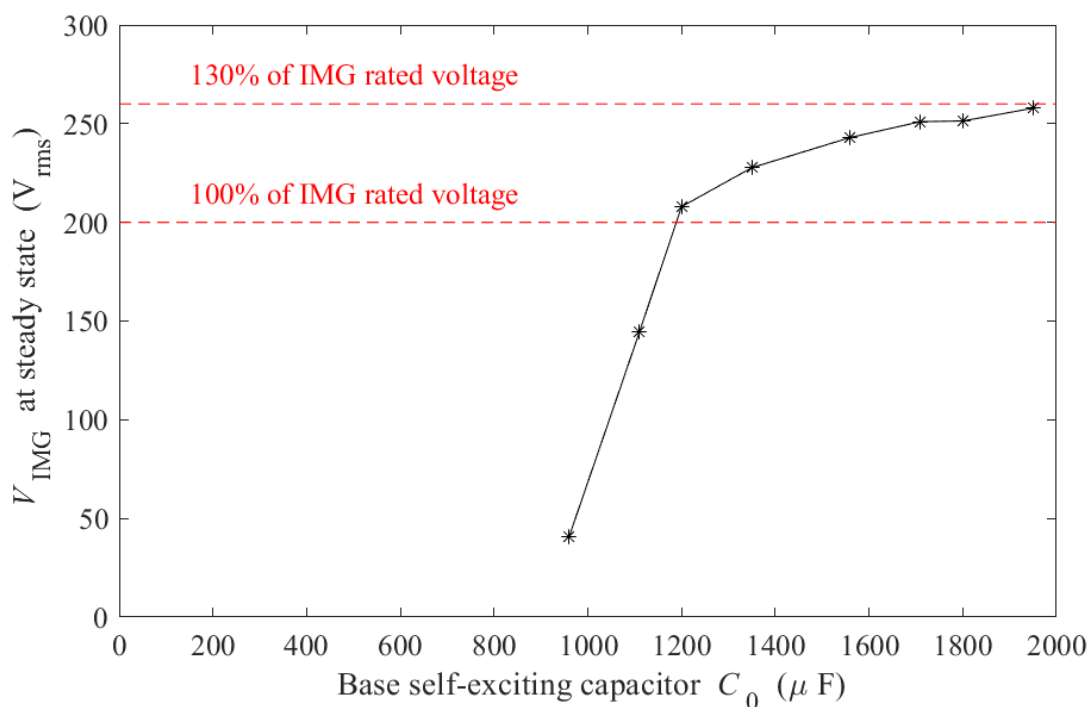


図 3.10: PHiX 用自励誘導発電機の自励キャパシタ容量と定常時の発電機電圧の関係。ある程度の容量を接続すると電圧ビルドアップが発生する。横軸のキャパシタ容量は実験で△結線接続した容量である。

### 3.3.3 軽負荷通電実験

まず、自励誘導発電機の定格出力よりも十分に低い電力で通電実験を行った。このときの回路構成は図 3.11 のとおりである。この実験では既存のフライホイール付き誘導発電機とインバータ電源を用いて提案する回路の原理実証を行った。この実験では加速のみを図 2.6 で示した既存の典型的な三相ベクトル制御インバータを用いて行った。インバータが発生する矩形波を直接自励キャパシタに印加するとキャパシタに大電流が流れてインバータ・キャパシタどちらか、または両方が破損する可能性があることから、切換部に電磁接触器を設けている。運転時にはどちらか一方のみが接続されるようにシーケンスが設定されている。また誘導発電機が発生する電圧は交流、磁場コイルが必要とする電圧は直流であることから、交流直流変換を行うダイオードを介

してポロイダル磁場コイル電源に電力を供給している。

図 3.12 は通電時の各素子の有効電力・無効電力である。インバータの出力は出力デューティが 40% に設定されているため、運転時にはスイッチング周期の 40% の期間だけ正の電圧が、60% 期間だけゼロ電圧が印加されている状態である。同図内の有効電力を表す黒線から分かるように、負荷側の有効電力は  $P_{load}$  では正の値を、発電機側の有効電力は  $P_{MG}$  負の値を示している。自励キャパシタへの有効電力  $P_{cap}$  はほぼゼロであるから、これより発電機から負荷に電力が供給されていることが分かる。また同様に赤線で示された無効電力について注目すると、自励キャパシタでは正の値、誘導発電機では負の値を取っていることがわかる。ここでの無効電力の定義は式 (2.37) によることから、自励キャパシタから誘導発電機に向けて進み無効電力が供給されていると言える。

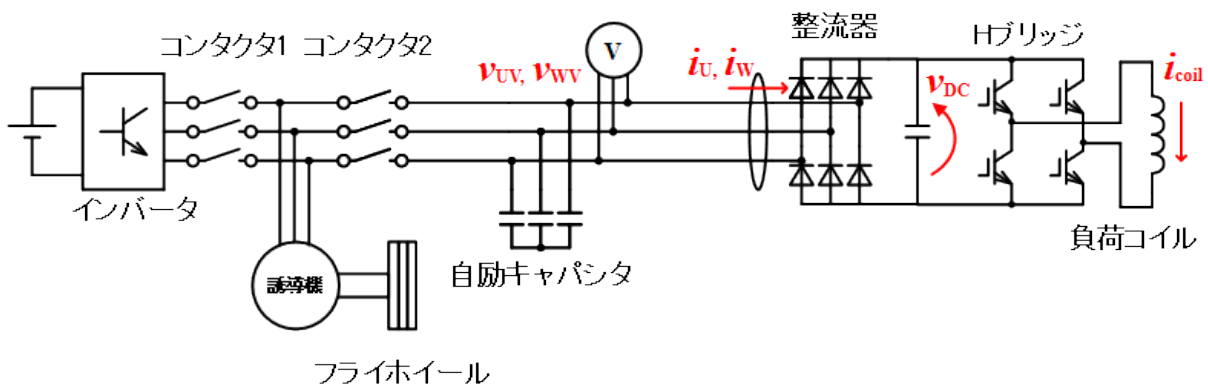


図 3.11: 軽負荷となるポロイダル磁場コイルに通電したときの回路構成。H ブリッジ回路を経由して負荷であるポロイダル磁場コイルに接続されている。

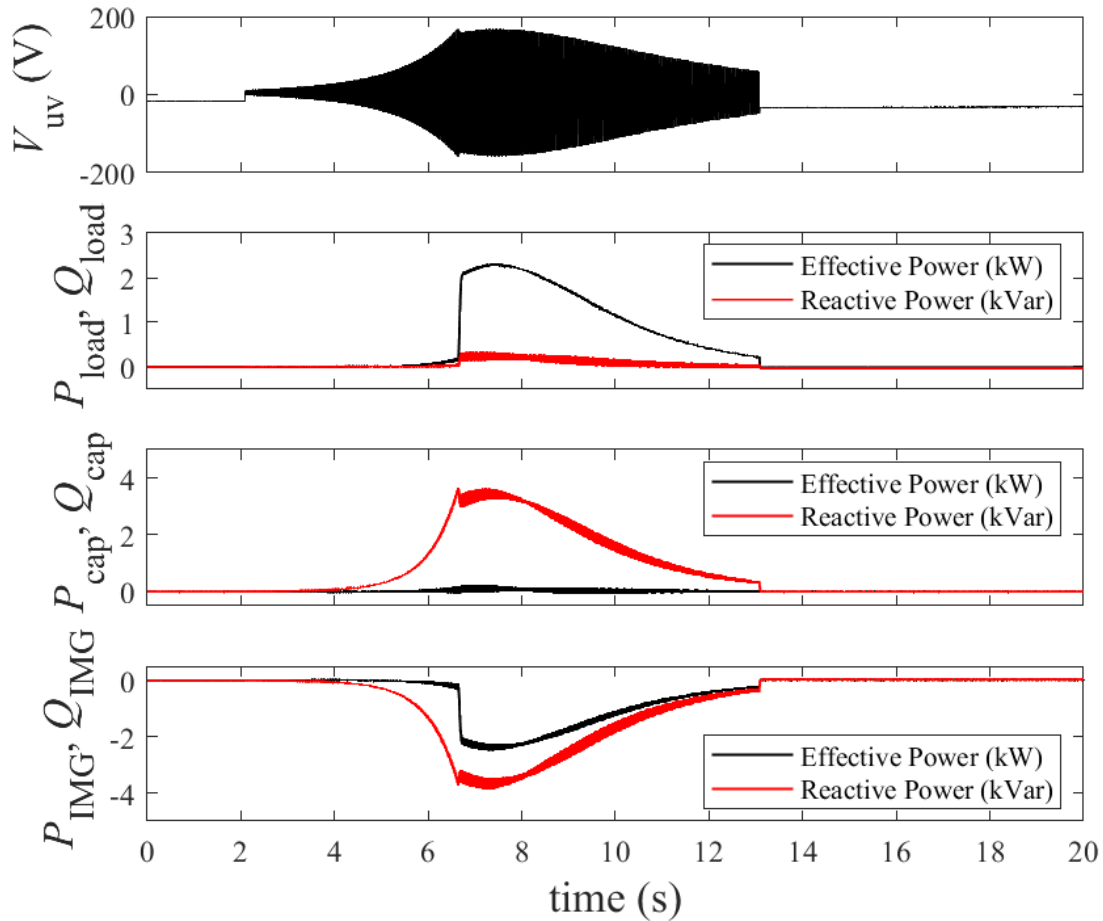


図 3.12: PHiX のポリダル磁場コイルを用いた軽負荷通電試験結果。上から順に発電機電圧・負荷電力・自励キャパシタ電力を表している。正の有効電力・無効電力はそれぞれ電力を消費していること、母線に進み無効電力を供給していることを示している。

### 3.3.4 コンタクタ接続によるトロイダル磁場コイル励磁実験

図 3.13 のようにフライホイール付き自励発電機を十分にビルドアップさせたのち、トロイダル磁場コイル直近の電磁接触器によってトロイダル磁場コイル通電を行った。これにより前節の軽負荷実験に比べて重負荷

での原理実証に成功した。また通電開始と同時に SSR を用いて追加の自励キャパシタを接続した。電圧ビルドアップ時から常に接続されている自励キャパシタ容量を  $C_0$ 、通電開始と同時に接続される自励キャパシタ容量を  $C_1$  とする。図 3.14 は通電波形である。通電開始の 4 秒前にコンタクタ 2 を接続して電圧ビルドアップを開始した。その後発電機電圧が十分に定常になった後にコンタクタ 3 を閉じることでトロイダル磁場コイル通電を行った。この時の  $C_0 = 4000 \mu\text{F}$ 、 $C_1 = 1000 \mu\text{F}$  である。一度コンタクタ 3 を閉じた後は実験終了まで閉じたまま出力電流制御は行っていない。そのため重負荷接続によりキャパシタ自励現象による電圧の維持ができなくなり、徐々に発電機電圧が減少していることがわかる。軽負荷試験に比べて減衰の程度が大きいこともわかる。以上の実験により、自励誘導発電機を用いたパルス電源で、誘導発電機の定格出力 55 kW の 2 倍以上となる最大負荷電力 117 kW が実証された。以上の実験結果を踏まえて続く試験のために制御盤の製作を行った。

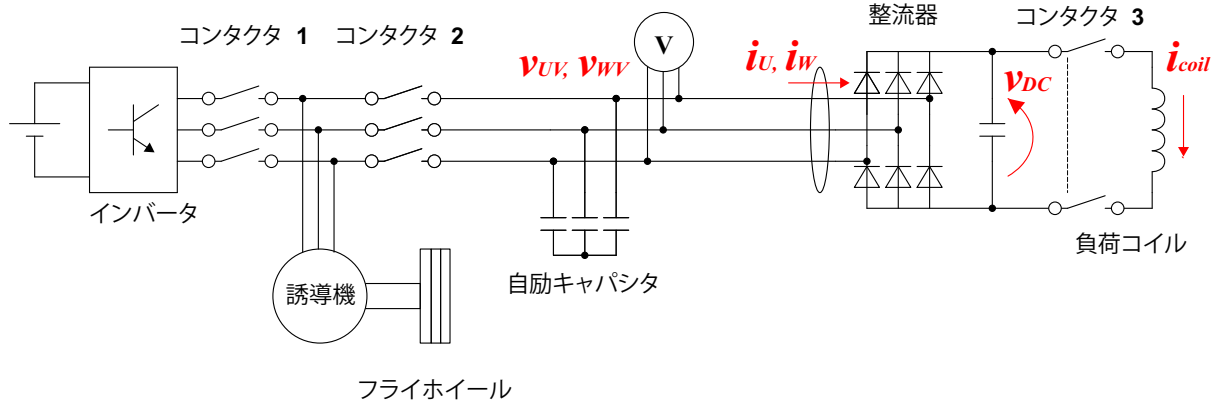


図 3.13: 重負荷となるトロイダル磁場コイルに通電したときの回路構成である。交流直流変換器であるダイオード整流器を介して負荷に接続している。負荷の接続には富士電機コンタクタを用いている。

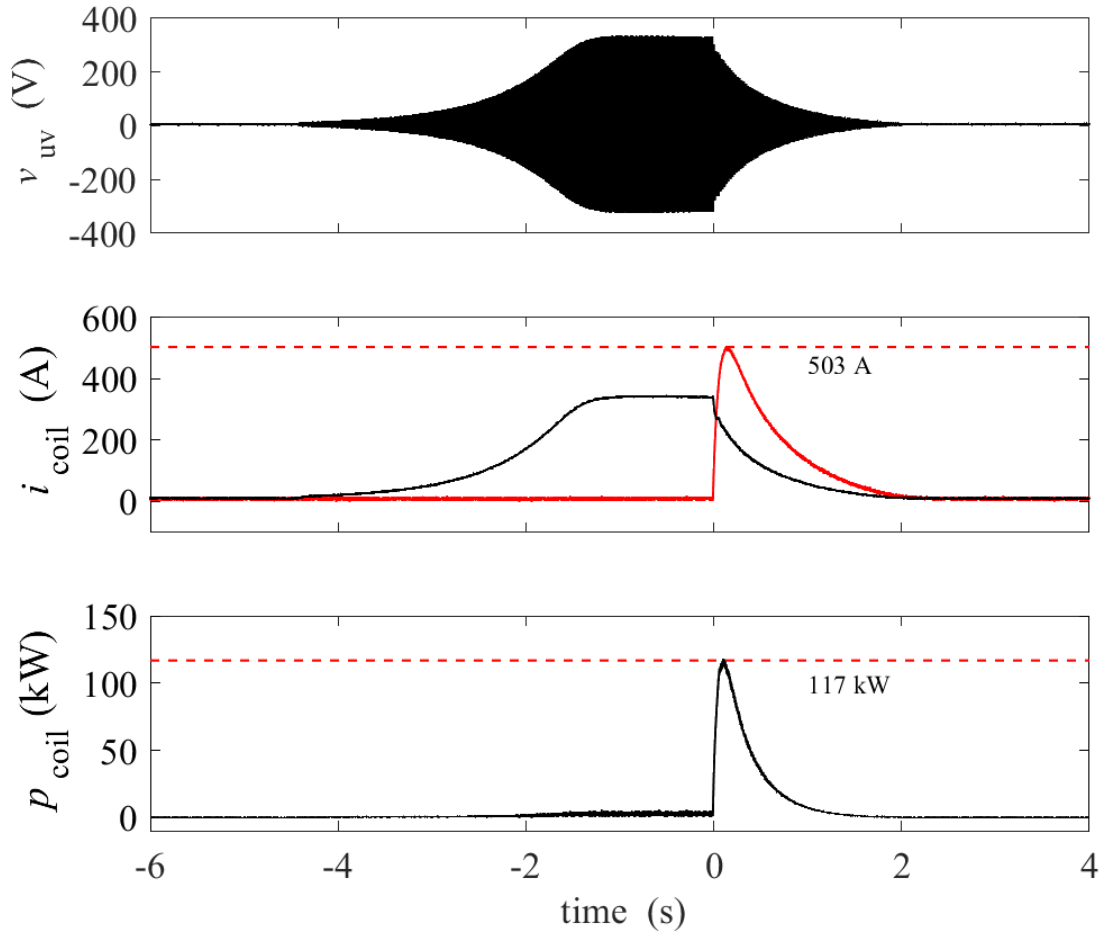


図 3.14: PHiX におけるコンタクタ接続による負荷通電試験結果

### 3.3.5 チョッパ回路を用いた自励誘導発電機実験

これまでの実験を踏まえて、PHiX 用トロイダル磁場コイル制御盤の製作を行った。概念設計と部品の調達後、制御盤の詳細設計・加工製作は共立電機株式会社（神奈川県川崎市高津区）に依頼した。製作後に据え付けを行った制御盤の外観を図 3.15 に示す。また製作で制御盤内に組み込まれた主回路構成と主要機器一覧は

それぞれ図 3.16 と表 3.3 に示すとおりである。制御用に三菱電機のシーケンサが組み込まれており、誘導発電機切替用のコンタクタや三相インバータ、SSR の制御線がシーケンサからの命令によって動作している。外部のパソコンからシーケンサへラダー図によるプログラムを書き込むことで運転シーケンスの時間間隔やキャパシタ投入量、負荷電流指令値を変更することができる。



図 3.15: PHIX トロイダル磁場コイル用自励誘導発電機制御盤内外の写真

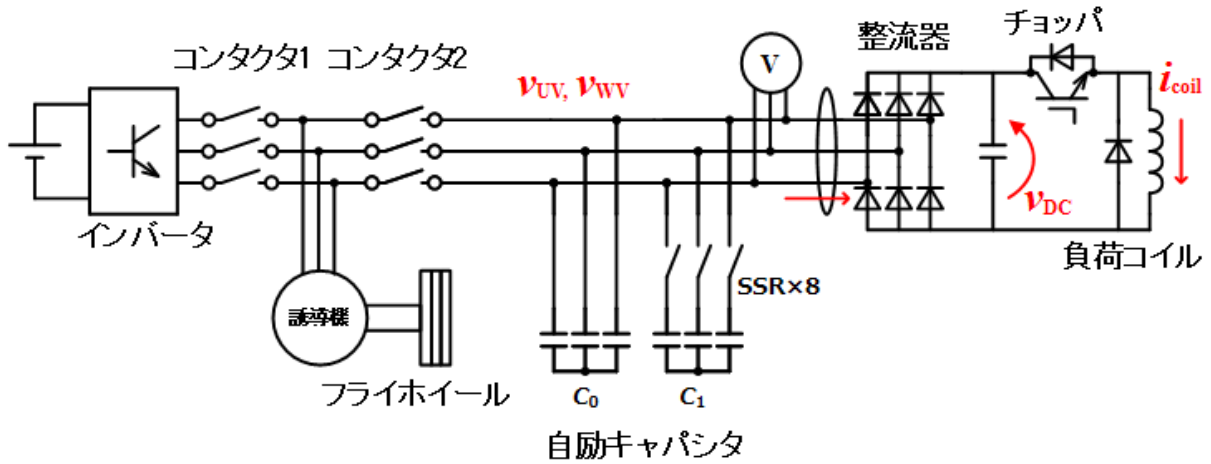


図 3.16: PHiX トロイダル磁場コイル用自励誘導発電機制御盤の主回路構成

表 3.3: PHiX 用自励誘導発電機制御盤に用いられている主要部品

部品名	型番	個数
PLC	三菱電機 FX3S-30MT/ES-2AD	1
加速用インバータ	富士電機 FRN11C2S-2J	1
自励キャパシタ	指月電機 MEC-RM	12
Transistor for DC/DC converter	Infenion FF600R12ME4	1
SSR	KUDOM KSQF480D60	1
ダイオード整流器	Vishay VS-160MT80KPBF	1

### 3.3.6 追加自励キャパシタによる運転可能領域の拡大

重負荷の接続により電圧降下が発生すること、また回転数の減少により自励現象が起こりにくくなることから通電中は自励キャパシタ容量を大きくして高い発電機電圧を維持することが望ましい。しかし過剰な自励キャパシタを接続すると待機状態で発電機電圧が過電圧になるため、通電シーケンス前は接続できる自励キャパシタ容量に限界がある。図 3.17 は電圧ビルドアップのために  $1800 \mu\text{F}$  の基本自励キャパシタ  $C_0$  を接続して  $470 \text{ A}$  をコイル電流指令値としたときの通電波形である。コイル通電開始から  $0.1$  秒付近でコイル電流値が指令値に到達してオンオフ制御による IGBT のスイッチングが開始される。その後スイッチングが 8 回行われた後、コイル通電開始から  $0.2$  秒付近で発電機電圧の不足により IGBT はオン状態を維持したままになる。このことからこのことからフラットトップが達成されているのは  $0.1$  秒未満であることが分かる。

先行研究 [28] では、誘導発電機の回転数が低下したときに電圧を維持するために半導体で構成されるスイッチである SSR (ソリッドステートリレー) を用いて追加の自励キャパシタを接続していた。一方、自励誘導発電機では重負荷の接続によって電圧が低下して自励キャパシタが供給する無効電力が減少する。そこで無効電力の減少を補うために先行研究同様に SSR による追加自励キャパシタを適用した。製作した制御盤ではコイル通電途中に自励キャパシタを追加で接続できるように SSR 経由で接続される追加自励キャパシタが存在する。これを用いて追加自励キャパシタによる通電時間の延長と取り出される総エネルギー量の増加を図った。追加自励キャパシタによる通電波形例は図 3.18 のとおりである。図の実験に加えてコイル通電開始と同時に  $600 \mu\text{F}$  の追加自励キャパシタを接続している。これにより  $0.1$  秒だったフラットトップ時間を  $0.2$  秒以上に延長することができた。

また通電開始時の初期回転数、すなわちフライホイールの待機状態における回転数とトロイダル磁場コイルの電流指令値を変化させて  $0.3$  秒間の通電が維持できるか領域を探索した。図 3.19 は追加自励キャパシタ容量  $C_1$  を変化させたときの実験結果である。 $0.3$  秒間の通電が可能だった条件を○、不可能だった条件を×で表示している。 $C_1 = 0 \mu\text{F}$ 、すなわち通電開始と同時に追加で自励キャパシタを投入しない場合は定格回転数  $1800 \text{ rpm}$  において最大でも  $360 \text{ A}$  しか通電できないことがわかる。続いて  $C_1 = 200 \mu\text{F}$ 、すなわち通電と同時に  $200 \mu\text{F}$  自励キャパシタを追加することで  $470 \text{ A}$  の通電に成功している。以上のことから、追加自励キャ

パシタにより通電時間の延長が可能であることが実証された。

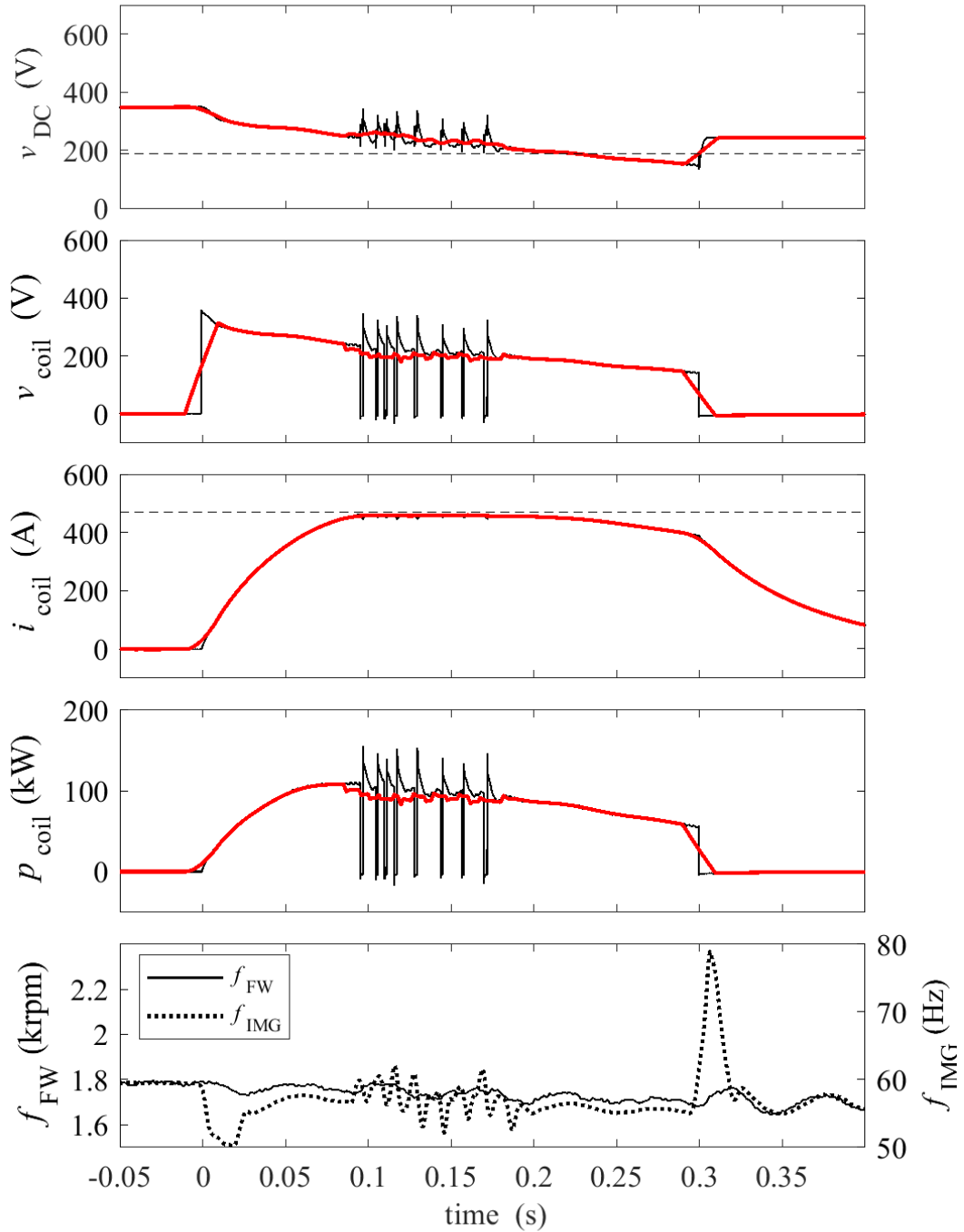


図 3.17: 基本自励キャパシタのみでの通電波形。上から順に DC リンク電圧、コイル電圧、コイル電流、コイル電力、フライホイール回転数と電気周波数である。赤色の波形は 20 ms の移動平均フィルタで平滑化した波形である。

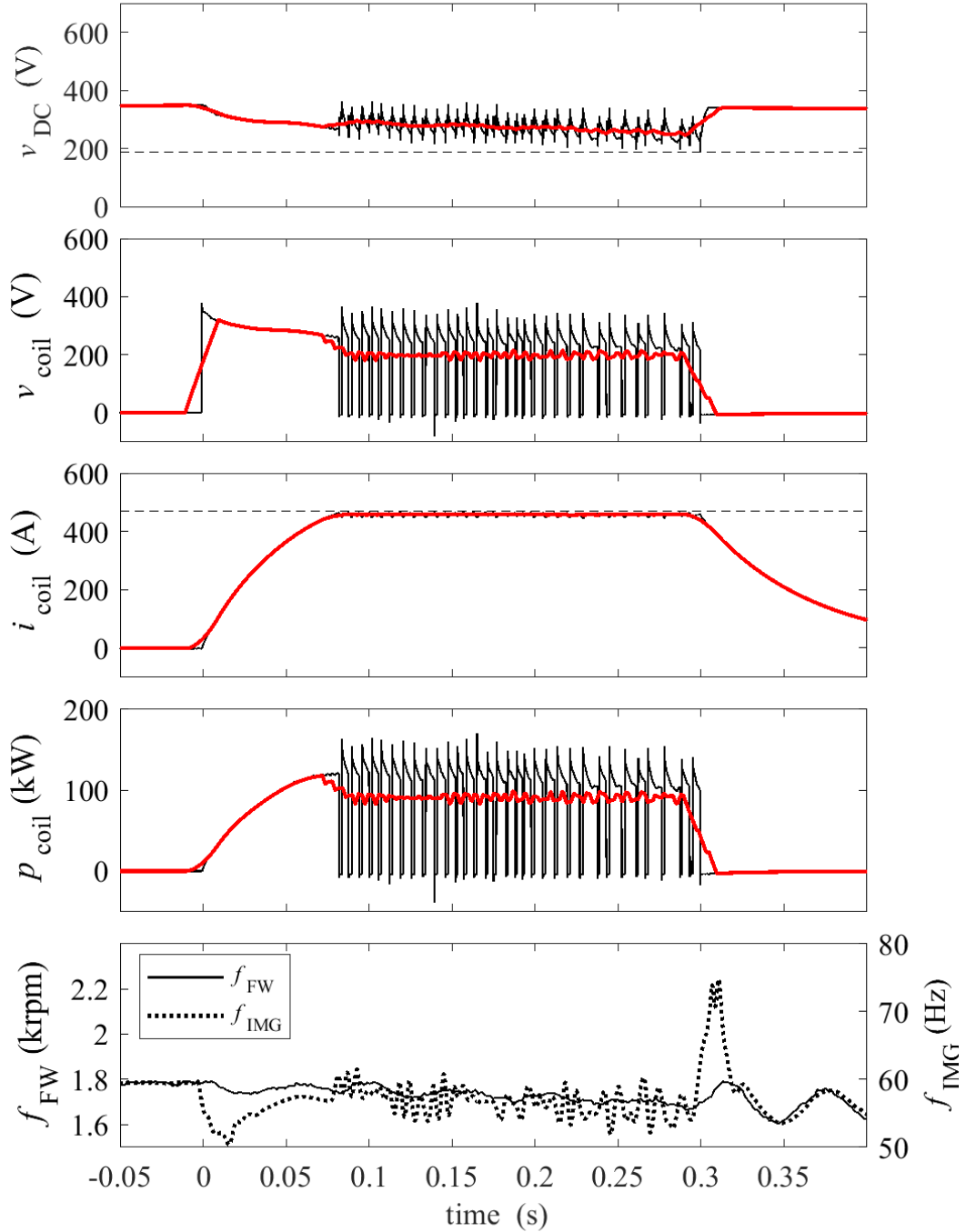


図 3.18: 追加自励キャパシタありでの通電波形例。上から順に DC リンク電圧、コイル電圧、コイル電流、コイル電力、フライホイール回転数と電気周波数である。赤色の波形は 20 ms の移動平均フィルタで平滑化した波形である。

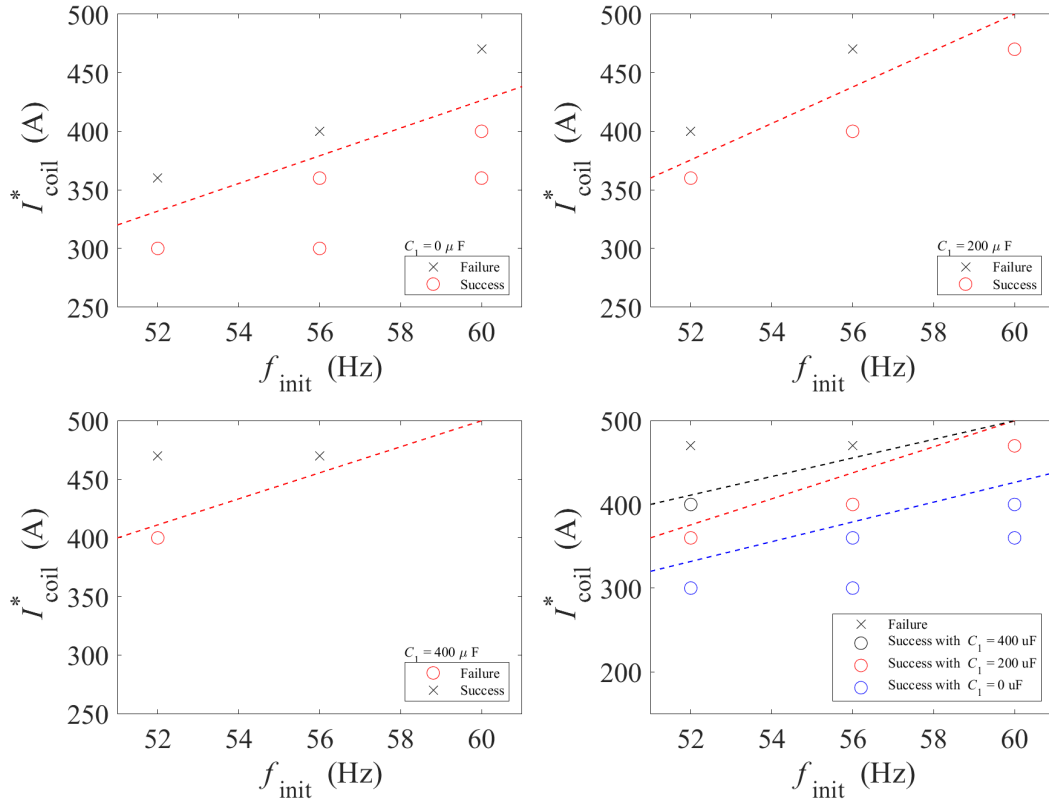


図 3.19: 実験に伴う自励キャパシタ投入量と指令値電流を変化させたときの運転可能領域。左上、右上、左下の順に追加自励キャパシタ容量  $C_1 = 0 \mu\text{F}$ 、 $200 \mu\text{F}$ 、 $400 \mu\text{F}$  の場合である。また右下がそれら実験をまとめた運転領域である。



## 第4章

(査読論文執筆中につき非公開)



## 第5章

(査読論文執筆中につき非公開)



## 第6章

### 結論

本論文では、まず序論にてトカマク装置の歴史と原理に言及しながら磁場コイル電源装置への要求について解説を行った。第2章ではフライホイール付き誘導発電機の要素であるフライホイールと誘導発電機についてそれぞれ原理の解説を行った。第3章と第4章ではそれぞれトカマク装置 PHiX と PLATO におけるトロイダル磁場コイル電源の設計と製作について述べた。PHiX と PLATO では主回路構成に違いはあるが、どちらも電力をフライホイールの運動エネルギーから得ている点、またかご形誘導発電機をキャパシタ自励現象によって励磁しているという特徴がある。製作した装置としては 55 kW 誘導発電機を用いた PHiX 用最大出力 117 kW・定常出力 90 kW0.2 秒パルス電源、250 kW 誘導発電機を 2 台用いた PLATO 用最大出力 850 kW・定常出力 470 kW0.7 秒パルス電源（模擬コイル試験結果）となる。また第5章ではこれまで専ら定常等価回路で解析が行われていた自励誘導機の設計について、ベクトル制御モデルを導入して固有値問題を解くことで発電機の端子電圧の挙動が計算できることを明らかにした。以上のように、本論文ではこれまで実用されていなかった自励誘導発電機の磁場コイル電源への応用について実証を行った。またベクトル制御モデルを用いることで自然に自励現象が正の固有値をもつ正のフィードバック現象であることを明らかにした。

第1章では、核融合についての概要に触れつつ、本研究で対象としているトロイダル磁場コイル電源装置を含めてトカマク装置で必要とされる装置全般について概説した。第2章では、フライホイールと自励誘導発電機について、それぞれ他方式のエネルギー蓄積装置と発電機に言及しながらその原理について詳述した。フライホイールとは、回転体の慣性モーメントを利用してエネルギーを蓄積する装置であり、機械工学においては回転運動の変動を抑制するために広く用いられている。従来、ほとんどの小型トカマク装置にはキャパシタを

用いているが、フライホイールはキャパシタに比べてエネルギー密度が大きく、電源装置の小型化のために有利である。しかしフライホイールは回転運動としてエネルギーを蓄えるため、回転運動を電力に変換する変換装置、すなわち発電機が必要である。そこで本研究では鉄製フライホイールに、電動機としても利用可能な誘導発電機を使用することで、電気エネルギーと運動エネルギーについて双方向の変換を可能としている。第 3 章では、東京工業大学にある小型トカマク装置 PHiX において従来から用いられていたフライホイール付き誘導発電機に、新たに自励現象の誘起と直流電流制御を行う制御盤を追加することで誘導発電機の出力の増大を図った設計と実験結果について説明し議論した。従来、PHiX では小型トカマク装置でありながら三相インバータとフライホイールエネルギー蓄積装置を用いたトロイダル磁場コイル電源を有していた。さらなる増強を行うため、インバータを用いずにキャパシタ自励現象により電圧を発生させた後、ダイオード整流器経由して直流電流を得る方式を採用した。以上の方法により同一の誘導発電機を使用した従来のインバータ方式での実験に比べて、2 倍以上にあたる最大消費電力 128kW を達成した。第 4 章では（査読論文執筆中につき非公開）。第 5 章では（査読論文執筆中につき非公開）。

### 6.1 残された課題

本研究では誘導発電機の自励現象に着目してフライホイール付き誘導電動発電機を交流電源としたトカマク装置のトロイダル磁場コイル用パルス電源の製作を行ったが、その設計は実験的な内挿・外挿に拠るところが多かった。（査読論文執筆中につき一部非公開）

## 業績

### 査読論文

- [1] M. Murayama, S. Kato, H. Tsutsui, S. Tsuji-Iio and R. Shimada, “Combination of flywheel energy storage system and boosting modular multilevel cascade converter”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 28 (2018) 1–4. doi:10.1109/TASC.2018.2806914. (第2章)
- [2] M. Murayama, S. Kato, H. Tsutsui and S. Tsuji-Iio, “Magnet coil power supply by a self-excited induction generator with a flywheel for a small tokamak, PHiX”, Fusion Eng. Des. 148 (2019) 111270. doi:10.1016/j.fusengdes.2019.111270. (第3章)
- [3] Masamichi Murayama, Shuhei Kato, Akihie Fujisawa, Keisuke Matsuoka, Hiroaki Tsutsui, Shunji Tsuji-Iio and Ryuichi Shimada, “Design and Implementation of DC Pulsed Power Supply Employing Self-excited Induction Generators and Flywheels for Toroidal Field Coils of a tokamak device, PLATO” . (under review、第4章)

### 国際会議における発表

- [1] “Cascaded Multilevel Converter with Floating Capacitors for a small tokamak, PHiX”, Magnet Technology 25, Mon-Af-Po1.12-08, Sep. 2017, Amsterdam, Netherland.
- [2] “Toroidal Field Power Supply Using Self Excited Induction Generator with Flywheel”, Plasma Conference 2017 (Plasma2017), 23P-54, Nov. 2017, Himeji, Japan.
- [3] “Design and Implementation of DC Pulsed Power Supply Employing Self-excited Induction Generators and Flywheels for Toroidal Field Coils of a tokamak device, PLATO”, TUE-MO-PO2.02-05, Sep. 2019, Vancouver, Canada.

## 国内会議における発表

- [1] 「自励誘導発電機を用いた小型トカマク装置 Plato のトロイダル磁場コイル電源の設計と試作」平成 30 年電気学会全国大会, 2402-A4, 2018 年 3 月, 福岡県 九州大学 伊都キャンパス 2402 会場
- [2] 「PLATO の TFC 電源に向けた FW 付き自励誘導発電機の大容量化と低ノイズ化」第 36 回 プラズマ・核融合学会 年会, 29Dp03, 2019 年 11 月, 愛知県 中部大学 春日井キャンパス D 会場学会ポスター発表

## 特許

- [1] 「パルス直流電源」特開 2019-92365 発明者

## 参考文献

- [1] 数研出版編集部. “新課程 視覚でとらえるフォトサイエンス 物理図録”. 数研出版, 2012. (ISBN:978-4-410-26513-6)
- [2] 数研出版編集部. “改訂版 視覚でとらえるフォトサイエンス 化学図録”. 数研出版, 2013. (ISBN:978-4-410-27315-5)
- [3] IAEA. “Power Reactor Information System (PRIS) database”.
- [4] 鈴木康浩. “Wendelstein 7-X の設計思想と磁場配位特性”. プラズマ・核融合学会誌 = Journal of plasma and fusion research, Vol. 93, No. 7, pp. 309–318, 2017. (<https://ci.nii.ac.jp/naid/40021279994/>)
- [5] N Tesla. “A New System of Alternate Current Motors and Transformers”. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. V, No. 10, pp. 308–327, 1888. (doi:10.1109/T-AIEE.1888.5570379)
- [6] R.A Pitts, R Chavan, and J.-M Moret. “The design of central column protection tiles for the TCV tokamak”. Nuclear Fusion, Vol. 39, No. 10, pp. 1433–1449, 1999. (doi:10.1088/0029-5515/39/10/306)
- [7] A. Fasoli, S. Alberti, P. Amorim, C. Angioni, E. Asp, R. Behn, and Others. “Overview of physics research on the TCV tokamak”. Nuclear Fusion, Vol. 49, No. 10, p. 104005, 2009. (doi:10.1088/0029-5515/49/10/104005)
- [8] 中村浩和, 小栴明大, 鈴木康慎, 江口直也, 佐藤義久, 嶋田隆一. “風力発電におけるフライホイール蓄積容量に関する研究”. 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌, Vol. 122, No. 3, pp. 247–252, 2002. (doi:10.1541/ieejias.122.247)
- [9] 犬塚 浩平, 京泉勉, 小佐々哲成, 佐々木俊英, 武内紳. “電化区間末端の電圧補償手法に関する一考察”. 平

成 30 年電気学会全国大会, 2018

- [10] 佐藤皓. “J-PARC 主リング電源電力変動補償の検討”. KEK 報告書, 2015
- [11] J B Hicks. “The jet pulse power supply system”. *Revue de Physique Appliquee*, Vol. 12, No. 12, pp. 1823–1828, 1977
- [12] R. Shimada, M. Tsuneoka, T. Matsukawa, T. Aoyagi, K. Oumori, M. Mizuno, M. Matsukawa, S. Takahashi, M. Shiina, N. Miya, K. Arakawa, and S. Tamura. “JT-60 power supplies”. *Fusion Engineering and Design*, Vol. 5, No. 1, pp. 47–68, 1987. (doi:10.1016/S0920-3796(87)90556-4)
- [13] A Nerem. “DIII-D POWER SUPPLY, DESIGN, AND DEVELOPMENT”. Technical Report GA-A21957, General Atomics, 1995
- [14] 三浦幸俊, 星野克道, 草間義紀. “JFT-2M トカマクの 21 年間の実験を振り返って”. *プラズマ・核融合学会誌*, Vol. 80, No. 8, pp. 653–661, 2004. (doi:10.1585/jspf.80.653)
- [15] C Käsemann, E Grois, F Stobbe, M Rott, K Klaster, and Upgrade Team. “Pulsed power supply system of the ASDEX upgrade Tokamak research facility”. In *Proceedings of 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 237–242, 2015. (doi:10.1109/EEEIC.2015.7165545)
- [16] S Hatakeyma, F Yoshino, H Tsutsui, S Hatakeyma, F Yoshino, and H Tsutsui. “Flywheel induction motor-generator for magnet power supply in small fusion device Flywheel induction motor-generator for magnet power supply in small fusion device”. *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*, Vol. 043509, , 2016. (doi:10.1063/1.4945799)
- [17] S Kato, M Cheng, H Sumitani, and R Shimada. “Semiconductor Power Converterless Voltage Sag Compensator and UPS Using a Flywheel Induction Motor and an Engine Generator”. In *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*, pp. 1680–1685, 2007. (doi:10.1109/PCCON.2007.373188)
- [18] 加藤修平, 程苗苗, 炭谷英夫, 嶋田隆一. “フライホイール誘導機式瞬低保護装置の貯蔵容量設計と 50kW 機による実験的検証”. *電気学会論文誌D (産業応用部門誌)*, Vol. 129, No. 4, pp. 446–452, 2009. (doi:10.1541/ieejias.129.446)

- [19] 三浦弘雅. “フライホイール付誘導発電機の過負荷領域利用”. 修士論文, 東京工業大学, 2014
- [20] 馬場達也. “インバータ駆動フライホイール発電機の小型トカマク装置への適用”. 修士論文, 東京工業大学, 2015
- [21] Mhamdi Taoufik, Barhoumi Abdelhamid, and Sbita Lassad. “Stand-alone self-excited induction generator driven by a wind turbine”. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 57, No. 2, pp. 781–786, 2018. (doi:10.1016/j.aej.2017.01.009)
- [22] S Khatua, S Mishra, S Pati, A Choudhury, and K B Mohanty. “Voltage & frequency stabilisation of a SEIG based micro-hydro system through a DFIG based WECS equipped with BESS”. *2018 Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP)*, pp. 1–6, 2018. (doi:10.1109/ICSESP.2018.8376716)
- [23] Shinichi Nomura and Hiroaki Tsutsui. “Structural Limitations of Energy Storage Systems Based on the Virial Theorem”. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 27, No. 4, pp. 1–6, 2017. (doi:10.1109/TASC.2017.2652858)
- [24] Masamichi Murayama, Shuhei Kato, Hiroaki Tsutsui, and Shunji Tsuji-ii. “Magnet coil power supply by a self-excited induction generator with a flywheel for a small tokamak , PHiX”. *Fusion Engineering and Design*, Vol. 148, No. April, p. 111270, 2019. (doi:10.1016/j.fusengdes.2019.111270)
- [25] 泰文赤木. “瞬時無効電力の一般化理論とその応用”. *電気学会論文誌 B 電力・エネルギー部門誌*, Vol. 103, No. 7, pp. p483–490, 1983. (<https://ci.nii.ac.jp/naid/40002520230/>)
- [26] 足立良夫. “誘導機のコンデンサ自励現象とその応用に関する研究”. PhD thesis, 東京工業大学, 1962
- [27] 古川友三. “対数出力計の時定数飽和のペリオド計オーバーシュートに及ぼす効果”. *日本原子力学会誌*, 1970
- [28] 加藤修平. “フライホイール付誘導電動機による電力システムの停電保護と安定化に関する研究”. pp. 2–4
- [29] 松岡 啓介. “乱流実験トラス装置の設計”. *九州大学応用力学研究所所報*, 2011
- [30] Yoshihiko Nagashima and Akihide Fujisawa. “Experimental research plan of nonlinearity of tokamak edge turbulence in plasma turbulence observatory”. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1993, No.

August, 2018. (doi:10.1063/1.5048716)

- [31] Akihide Fujisawa. “Past and present experiments toward PLATO project”. AIP Conference Proceedings, Vol. 1993, No. 020011, pp. 1–13, 2018. (doi:10.1063/1.5048721)
- [32] 藤澤彰英, 稲垣滋, 井戸毅, 飯尾俊二. “統合観測システムで解き明かす乱流プラズマの構造形成原理と機能発現機構”. プラズマ核融合学会誌, 2019
- [33] 電気学会. “電気データブック”. 朝倉書店, 2011
- [34] 電気学会電気規格調査会. “JEC-2110 誘導機”. 電機書院, 2017. (ISBN:978-4-485-98991-3)
- [35] 金東海. “現代電気機器理論”. 電気学会, 2010. (ISBN:978-4-88686-280-8)

## 謝辞

本博士論文研究は所属する飯尾研究室内の関係者はもとより、学内外の多くの関係者の協力によって遂行されました。まず初めに本研究にご助力いただいた関係者の皆様に感謝を申し上げます。この場にてすべての方を挙げることはできませんが、特にお世話になった方々へ謝意を記します。

本研究は東京工業大学科学技術創成研究院先導原子力研究所飯尾研究室において行われました。指導教員である飯尾俊二教授には、本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜りましたことに深く感謝いたします。また、本研究の遂行及び研究室活動において多くのご助言、ご助力をいただきました東京工業大学原子炉工学研究所筒井広明准教授に感謝申し上げます。トカマク装置の運用と数学的・物理的な議論が可能な研究室の環境がなければ本研究で扱う電源装置の研究は成立しなかったと考えております。また嶋田隆一教授、嶋田研究室の卒業生である日本大学加藤修平助手には論文共著者として議論をいただいたこと感謝いたします。

トカマク装置 PLATO における実証実験につきまして核融合科学研究所松岡啓介名誉教授、九州大学藤澤彰英教授に深く感謝申し上げます。本研究は、提案方式が九州大学応用力学研究所にて建設中のトカマク装置 PLATO の電源装置として採用され、現地での実証実験を経ることで大きく進展させることができました。トカマク装置は日本国内の大学での新設が非常に稀となっていること、そして電源装置の研究開発は主に実験装置の建設時期にしか行えないことから、博士論文研究としてトカマク装置の電源の研究開発を遂行できたことは非常にありがたいことと考えております。このような機会を与えていただき、またプラズマ物理研究のあり方を示していただいたことを感謝申し上げます。また九州大学稲垣滋教授、井戸毅教授、文賛鎬助教、山崎広太郎博士には PLATO における実験で協力いただき、またプロジェクト会議を通してトカマク装置に必要なプラズマ計測に関するご助言をいただいたこと感謝いたします。

実際の電源装置の製作にあたっては、PHiX 用制御盤につきましては共立電機株式会社中条稔秋氏、PLATO 用フライホイールにつきましては株式会社メカトロシステム&デザイン研究所寺田聖一氏及びレゾニックジャパン川口卓志博士、PLATO 用制御盤につきましては愛知電機株式会社辻本賢次氏及び吉野真氏よりご助力を頂き、装置を完成させることができましたこと感謝申し上げます。

また嶋田研究室の卒業生である明治大学野村新一准教授、飯尾研究室の卒業生である量子科学技術研究開発機構畠山昭一氏には学会等において自励誘導発電機を含めた回転機の原理についての議論を行っていただきましたこと感謝申し上げます。また飯尾研究室卒業生である職業能力開発総合大学校小林孝行特任助教とは研究室において様々な議論を交わし、工学全般の理解を深めることができましたことを感謝いたします。最後に、研究室の諸後輩方には様々な場面で研究の手伝いを快く引き受けていただいたこと、私の両親にはこれまでの大学院生活支えていただいたことを心より感謝いたします。